

TRABAJO FIN DE GRADO

ADAPTACIÓN DE MOLINO DE GRANO HIDRÁULICO EN MICRO CENTRAL ELÉCTRICA AUTÓNOMA

TRABAJO FIN DE GRADO PARA
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

SEPTIEMBRE 2016

Lorenzo Esteban de la Iglesia

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:

Carlos Veganzones Nicolás

Introducción

El siguiente Trabajo de Fin de Grado plantea el desarrollo de la posible reconversión de un antiguo molino hidráulico para construir una microcentral eléctrica que opera de forma autónoma a la red.

Más concretamente, en el proyecto se diseña, dimensiona y desarrolla un accionamiento regulado con una turbina hidráulica acoplada a un motor de inducción del tipo jaula de ardilla con los elementos precisos para abastecer el consumo eléctrico monofásico de la vivienda.

La idea surge de aprovechar la situación que mi familia dispone en una finca con una concesión de agua con un salto, que se aprovechaba en un antiguo molino harinero situado en esta. El molino se encuentra en desuso desde hace décadas pero el edificio se utiliza como residencia particular.

El proyecto es especialmente interesante ya que, dentro de lo que es la generación in situ, la microhidráulica muestra ventajas. Es utilizada en países en vías de desarrollo para proveer electricidad a aquellos lugares donde la red eléctrica no es capaz de llegar. En los últimos años se puede apreciar en países desarrollados, en los que en algunos casos contribuyen a la red eléctrica. No tiene el impacto ambiental en uso de otras fuentes de energía, pues aprovecha pequeños saltos de agua que existen en la naturaleza, sin emisiones de gases ni presencia de grandes obras de ingeniería que modifiquen el paisaje. Además, se puede conseguir que estas instalaciones de microhidráulica tengan un precio reducido. Otra ventaja es que aprovechan un recurso regulable a diferencia de sol o viento y que no requiere de gastos en materias primas. Es por ello que puede representar una alternativa viable para aquellos lugares en donde las redes eléctricas no son accesibles.

No obstante el principal inconveniente que puede presentar este tipo de instalaciones sin la utilización de baterías o el apoyo de redes eléctricas es conseguir la estabilidad de la tensión. Se pretende en este estudio lograr una onda de tensión de suficiente calidad, utilizando exclusivamente condensadores, reactancias y convertidores electrónicos de diseño específico, así como los sensores asociados a estos y los elementos que procesan las señales.

Para el desarrollo de este trabajo se ha tenido que aplicar los conocimientos adjuntos a asignaturas tan variadas como máquinas eléctricas, control de máquinas eléctricas, electrónica industrial y sistemas de energía eléctrica. El hecho de que no haya una fuente de tensión ideal (red eléctrica) en la que apoyarse, requiere pues del uso de equilibrios de potencia que estabilicen amplitud y frecuencia de la tensión.

Indicar como particularidad del estudio que está destinado a plasmarse en el futuro en una instalación real, bueno más concretamente en la vivienda antes citada, por lo que a la presión académica a la que se ha sido sometido, se ha sumado la presión

familiar donde sus miembros han tenido opinión y a la que se ha intentado atender adecuadamente.

Por último decir que la estructura del trabajo ha sido la siguiente:

- En un primer capítulo, se expone la situación desde la que se empieza a plantear el problema.
- En un segundo capítulo, se desarrollan los distintos trabajos que existen relacionados con la temática.
- En un tercer capítulo se dimensiona, elemento a elemento la microcentral eléctrica.
- En un cuarto capítulo se plasman esos elementos en el entorno de programación de simulink.
- En un quinto capítulo se presentan distintas simulaciones, a las que se hace variar carga y potencia de entrada al generador.

Este trabajo requiere agradecerse a dos personas:

A mi padre porque siempre me ha permitido mucha libertad para plantear este TFG y es el que más esfuerzo a puesto en hacer cosas. Me ha brindado la oportunidad de realizar un Trabajo muy bonito y al que le he puesto mucha dedicación.

A mi tutor pues el departamento de máquinas eléctricas de la ETSII siempre ha estado muy ocupado con asignaturas, prácticas y demás trabajos, por lo que no sobra agradecerle que se haya ofrecido a ayudarme a plantearlo. Espero que esté explicado correctamente todo lo que deba así ser. Se me ha ofrecido mucha libertad para plantearlo y espero que sea correcto.

Contenido

1. Antecedentes y objetivos.....	8
Turbina y generador.....	12
Equipo del regulador de caudal	14
Equipo de control eléctrico.....	14
Estudio del impacto ambiental.....	15
2. Estado de la tecnología	17
2.1 Microgeneración autónoma o distribuida	19
2.2. Microturbinas.....	21
2.3 Sistemas de micro-generación eléctrica.....	26
3.- Diseño de la microcentral eléctrica	44
3.1. Dimensionado energético	46
3.2. Estructura general de la microcentral	48
3.3. Diseño del sistema de generación eléctrica	50
3.4. Sensores de medida.....	57
3.5. Protecciones.....	60
4.- Modelo de simulación de la planta.....	61
4.1. Entorno de simulación	63
4.2. Programación del modelo	64
6 Conclusiones	95
Anexos.....	99
Anexo PLL	101
Anexo filtro de paso bajo	102
Anexo: Otros métodos de obtener alterna	103
Presupuesto	106
Tiempo dedicado.....	107
Futuros desarrollos.....	108
Referencias	109

1. Antecedentes y objetivos

Se pretende realizar un estudio sobre la viabilidad del cambio de uso de una concesión de agua que disponía un antiguo molino de grano hidráulico, para adaptarlo al de un equipo de generación eléctrica autónomo, que pueda proveer con este tipo de energía a la residencia que se encuentra adaptada sobre este. Se parte de un estudio inicial, con consideraciones energéticas, infraestructura necesaria y elementos de los que se dispone en la turbina, para centrarse posteriormente en todo lo que viene siendo el sistema eléctrico.

Localización

Se dispone de una concesión de agua de 82l, y un salto de 8m, de un afluente del río Moral situado en el municipio de Fuentemolinos (Burgos), a la cual se la quiere cambiar su uso para molienda de grano, por el de generación eléctrica en una microcentral que opera de forma independiente de la red.



Figura 1.1. Vista del arroyo desde arriba. Desde A hasta B se sitúa la antigua presa del molino. En C se encuentra el antiguo molino, utilizado en la actualidad como residencia particular. De A a D circula el cauce natural del arroyo. Imagen obtenida mediante la herramienta SIGPAC.

Punto A (Toma de agua). En ese punto se realiza el desvío de parte de las aguas del arroyo de Fuentemolinos hacia un canal donde permite almacenar el agua. Las

coordenadas de este punto son: $41^{\circ} 36' 26,27''\text{N}$ y $3^{\circ} 50' 50,76''\text{W}$. Se incluye una fotografía.



Figura 1.2. Toma de agua Punto A

Punto B. Final del canal. En este punto se encuentra el final del canal y se encuentra la trampilla que permite el paso del agua hacia la casa de maquinas a través de un conducto situado en la base del canal. Las coordenadas de este punto son: $41^{\circ} 36' 30,52''\text{N}$ y $3^{\circ} 50' 47,58''\text{W}$.

Punto C (Casa de Maquinas). Es un habitáculo en el sótano del antiguo molino. Las coordenadas de este punto son: $41^{\circ} 36' 30,64''\text{N}$ y $3^{\circ} 50' 48,05''\text{W}$. Figura 1.3



Figura 1.3. Casa de máquinas, situada en el sótano de la vivienda, es donde se encuentra la turbina.

Punto D (Desagië). En este punto se devuelve el agua desviada a su cauce original. Las coordenadas de este punto son: 41° 36' 31,14''N y 3° 50' 50,33''W. Se incluye una fotografía de este punto en la figura 1.4.



Figura 1.4. Desagië.

Turbina y generador

Se obtuvo de un artesano. Es de tipo flujo cruzado y se explicará más adelante. La turbina dispone de un actuador que movido por un servomotor regula el caudal de agua que llega a los álabes. Esta regulación es lenta y se ha cronometrado que tarda unos 30 segundos en abrir completamente el actuador desde una posición en la que se encuentra cerrado completamente, lo que la hace inadecuada para regular la potencia que entra a la casa.

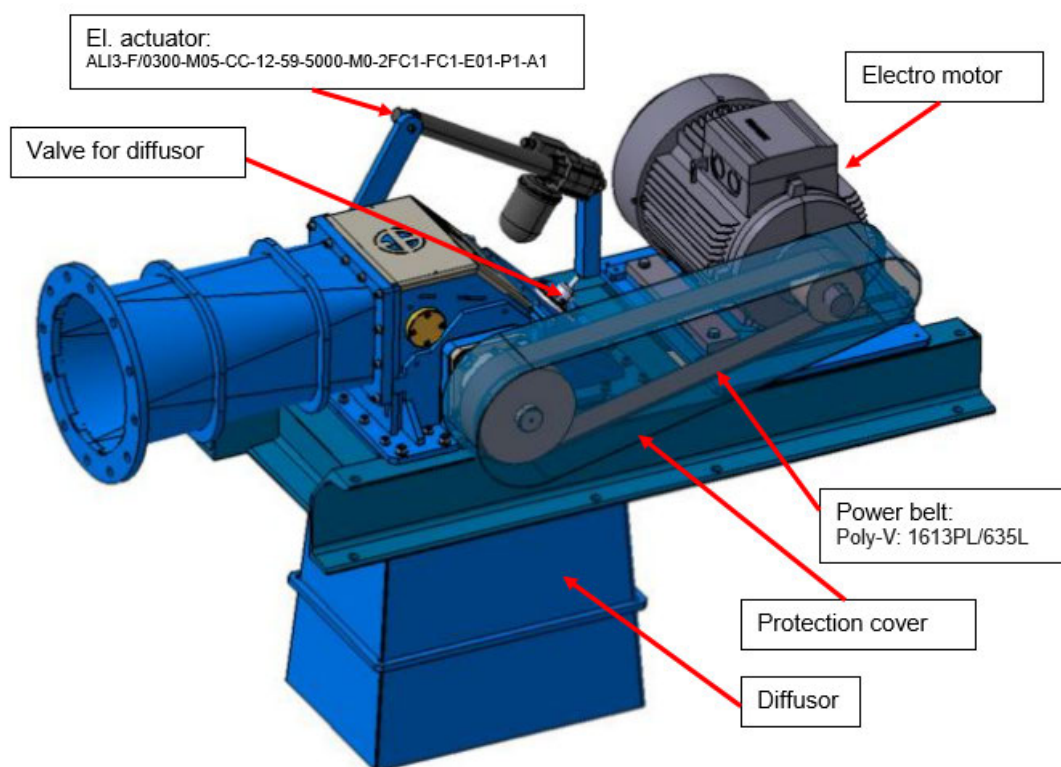


Figura 1.5. Imagen completa de la turbina y el generador con todos sus elementos. Obtenida del manual de la turbina

El rodete, en su zona de funcionamiento nominal, gira a una velocidad que se ajusta a la velocidad nominal de giro del rotor por medio de una correa que une ambos elementos.

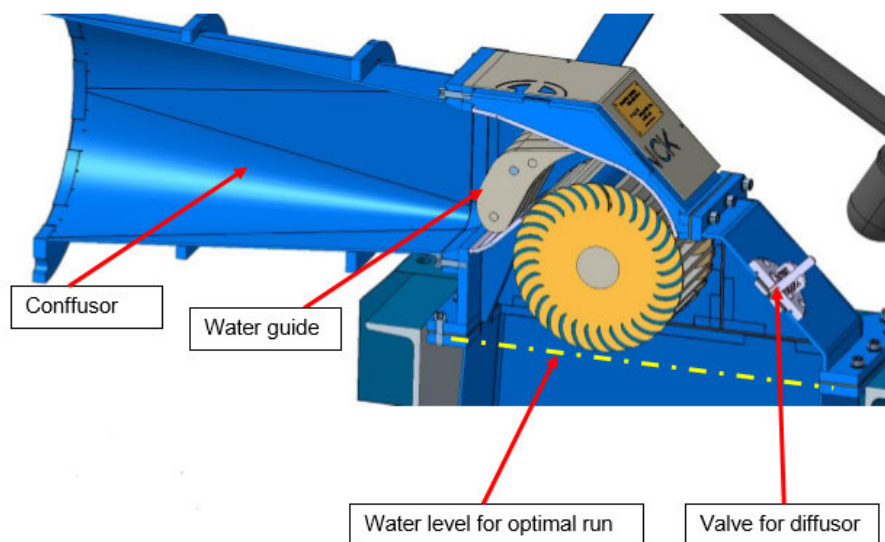


Figura 1.6. Elementos internos, regulador y álabes de la máquina en cuestión.

Por último, tenemos nuestra máquina asíncrona de 3 pares de polos, con la que se pretende generar electricidad.

Equipo del regulador de caudal

Se dispone de una máquina de continua, que a partir de los pulsos que atraviesan un puente H es capaz de abrir o cerrar el actuador que regula la entrada del caudal del agua hacia el rodete. Su control está construido por el tutor externo, se dispone de una lógica implementada en atmega (ARDUINO), que analiza la velocidad de giro del generador y automáticamente cierra la compuerta si se sobrepasa una velocidad límite, que se explicará en el tema 3.3.1 de Protecciones. También dispone de Ethernet, lo cual permite conocer el estado de la turbina y el control sobre el actuador, sin necesidad de operar en la sala de la máquina.

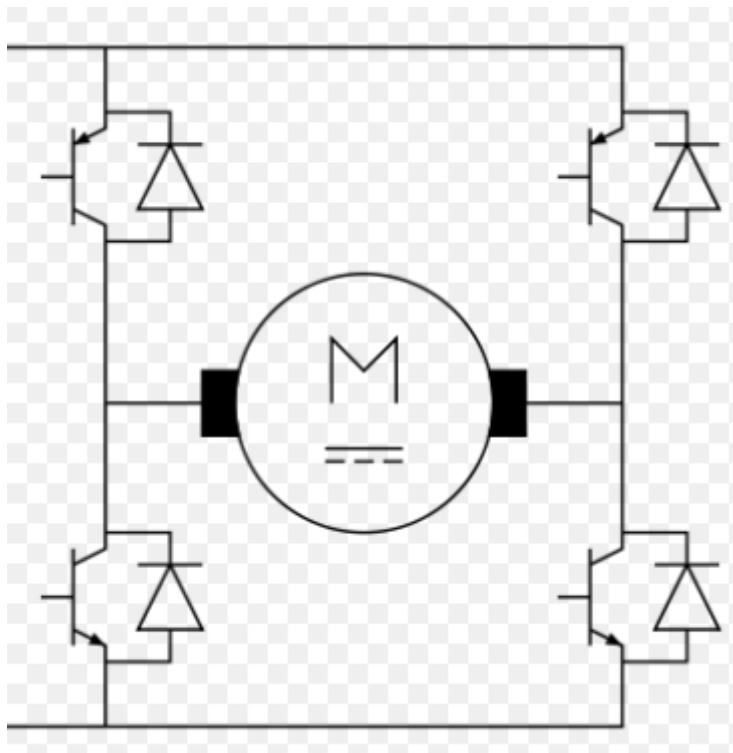


Figura 1.7. Regulación del servomotor, Regulado mediante MOSFET.

Equipo de control eléctrico

Es la parte que queda por hacer y es el objetivo del TFG. Es complejo de encontrar, pues hay que establecer una serie de consideraciones energéticas y tipo de carga que se quiere conectar. Aparte es difícil de encontrar a una empresa o particular que sepa elaborarlo.

Se creyó que habría algo hecho o que la realización de esto puede ser más o menos sencillo. Pero la realización de un buen equipo de control, requiere de la utilización de elementos especializados para ello y el plantear un trabajo de estos desde

el principio, sin tener experiencia previa, más allá de los conocimientos, requiere de gran inversión de tiempo. Primero en simulaciones y cálculos en las que adecuas los elementos y su correcto dimensionamiento y segundo en su construcción. No obstante se quiere añadir que gracias a toda la evolución que ha supuesto internet, se pueden encontrar trabajos relacionados que ayuden a plantear este desde un principio, aunque cada experto propone diferentes soluciones, lo que hace difícil el saber con claridad cuál es la mejor opción disponible.

Estudio del impacto ambiental

Un cambio en el uso de las aguas, requiere de un informe de impacto ambiental.

En este caso, como este cambio no implica modificaciones en la flora, en la fauna, aire, suelo y erosión, agua, ni paisaje, el impacto es nulo.

No hay cambio en la concesión del agua en términos de caudal y altura. Solo en el uso de un potencial. Todo esto está debidamente estudiado y presentado a la administración para poder así llevar a cabo el proyecto.

2.Estado de la tecnología

2.1 Microgeneración autónoma o distribuida

Se puede hacer funcionar este generador conectado a la red o de forma autónoma. En isla aparece planteado en la mayor parte del TFG y consiste en mantener unos equilibrios de potencias. Conectado a red hay que adaptarse a la legislación, que puede ser compleja y sobre todo puede variar.

En octubre de 2015 sale un Real Decreto [3] que sin entrar en detalles, plantea dos posibles conexiones a la red:

Se es un consumidor (tipo I): Se debe disponer de una potencia contratada al menos equivalente a la que se es capaz de generar, con los costes fijos que conlleva y no se puede vender el excedente. El ahorro está en consumir menos energía. Se debe pagar un respaldo por la energía que te aporta la red.

Se es una empresa (tipo II): Se produce a precio de mercado y se recibe por tanto un pago del valor de este.

En vista de estas dos posibles situaciones, parece mejor opción estar aislado de la red. Establecer una empresa (tipo II) para generar la relativa poca energía que se obtiene de un arroyo, no es rentable. El precio de la energía eléctrica, puede estar en torno a los 0,03 euros/KWh aprox, que es el precio al que venden los aerogeneradores y es competitivo. Al cabo de un mes, generando 4 KW de continuo pueden ser entorno a 80 euros, lo cual hace que no tenga sentido establecer una empresa por tan poco dinero. La otra opción (consumidor tipo I) tampoco es rentable pues con el aumento de los costes fijos, resulta que se paga por generar electricidad.

$$0,03 \text{ euros/KWh} \times 4\text{KW} \times 24\text{h} \times 30\text{días/mes} = 86,40 \text{ euros/mes}$$

vendiendo a precio de mercado.

El tratar al consumidor como indica el tipo I, le sitúa en una situación en la que entrega y consume potencia cuando quiere y sin ser capaz de adaptar su consumo a la oferta y la demanda. Esto puede parecer lógico cuando se aplica a generación eólica o solar. Pero la generación hidroeléctrica sí que es capaz de tener algo de regulación. Por ello se demostrará con simulaciones que esto se puede conseguir. Como la forma más sencilla de demostrar este hecho es la generación autónoma, se planteará el TFG de esta forma.

Hay otra opción, que consiste en justificar que tu equipo de generación eléctrica aporta ventajas a la red. Pero eso implica tramitaciones con la compañía distribuidora. Los trámites, independientemente de que la administración apruebe o no apruebe la propuesta realizada, requieren de tiempo.

La legislación busca defender el modelo actual, que de momento funciona. La obligación que tiene en todo momento es la de garantizar la demanda, tanto su estabilidad, como su viabilidad económica. Promover una legislación que pueda variar bruscamente el modelo, sin atender a estos criterios puede provocar una crisis, por lo que se comprende que la legislación sea rigurosa con este tema. España posee una muy buena red eléctrica y un sistema solidario que se puede comprometer bruscamente.

Esto es más fácil cuando son pocos los productores y entienden cómo funciona este mercado. Aquí hay uno de los retos actuales de la ingeniería eléctrica, cambiar un modelo de pocos productores que entienden cómo funciona el sistema a otro formado por miles de generadores.

Por tanto, demostrar que se puede generar electricidad sin apoyo de la red, es importante, para entender que dificultades supone. La generación distribuída es uno de los retos que tiene la ingeniería eléctrica y tratar de operar de forma autónoma ayuda a entender mejor el problema.

Otra ventaja que supone el funcionar de forma autónoma, está en garantizar que no haya fluctuaciones en la tensión, que en zonas rurales es más difícil de lograr, pues ante situaciones como las descargas atmosféricas, se producen sobretensiones, si no se está conectado a la red.

Por el contrario, surgen problemas en la generación autónoma al intentar adaptar el consumo tan brusco que puede tener una casa, con la generación, que no puede variar de forma tan exagerada.

2.2. Microturbinas

Este es un tema complejo, pues en función del caudal, de la altura del salto, del rendimiento o del presupuesto que se maneje, puede interesar una turbina u otra. Aquí se trata de explicarlas brevemente:

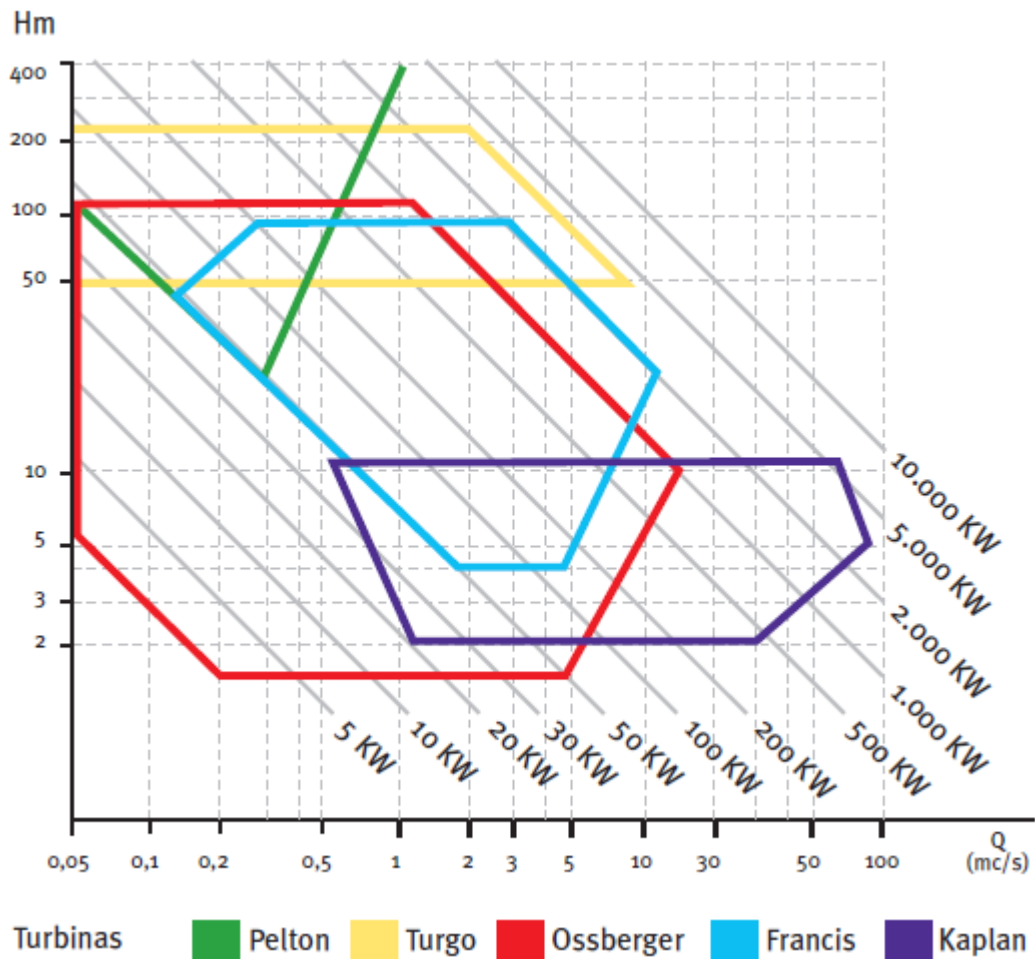


Figura 2.1. Tipos de turbina hidráulica utilizada, en función de caudal y altura

Podemos distinguir diferentes tipos distintos de microturbinas:



Figura2.4. Turbina Francis

Turbina Francis

Es un tipo de turbina utilizada en la mayoría de las centrales hidroeléctricas capaz de alcanzar una eficiencia del 90%. Fue diseñada a mediados del siglo XIX por el ingeniero de apellido homólogo, utilizando los métodos de cálculo más avanzados que había en la época.

Son turbinas costosas de realizar, pues cada una de ellas está hecha adaptándola a la aplicación de la que se quiere sacar provecho. Tiene como características principales un gran margen de potencias en las que puede ser aplicada y una buena distribución de caudales y alturas a la que se puede diseñar para lograr esa muy buena potencia. También se utiliza en las centrales de bombeo, las cuales son capaces tanto de entregar potencia hacia el embalse, como extraerla. Con los nuevos materiales y en la actualidad, pueden estar en continuo funcionamiento durante décadas.

Su principal inconveniente es que pierden mucha eficiencia cuando no operan con el caudal para el cual están diseñadas.

También se debe destacar que los saltos por encima de cierta altura (800 metros), la presión a la que está sometida la máquina puede deshacerse, por lo que no es aconsejable su uso.

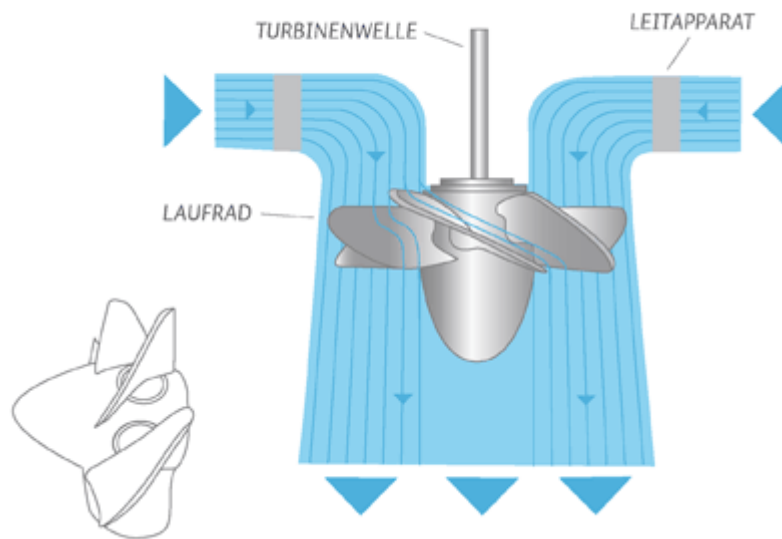


Figura 2.5. *Turbina Kaplan*

Turbina Kaplan

Es una turbina que asemeja su funcionamiento al de las hélices de un barco.

Está diseñada para obtener energía de saltos de muy poca altura y de gran caudal. En grandes centrales pueden obtener eficiencias superiores al 90%. Son costosas de realizar pues se fabrican individualmente y adaptándolas a la aplicación. Mantienen esa eficiencia siempre que consigan mantener los álabes del rodete sumergidos en el fluido. Es por ello, que los álabes son autoajustables, para mantener una alta eficiencia el mayor tiempo posible.

El hecho de que sean estas hélices regulables permite un buen rendimiento en un mayor margen de potencias. Cuando no son regulables, se suele llamar a este tipo de turbina, por el nombre de semikaplan.

Turbina Banki

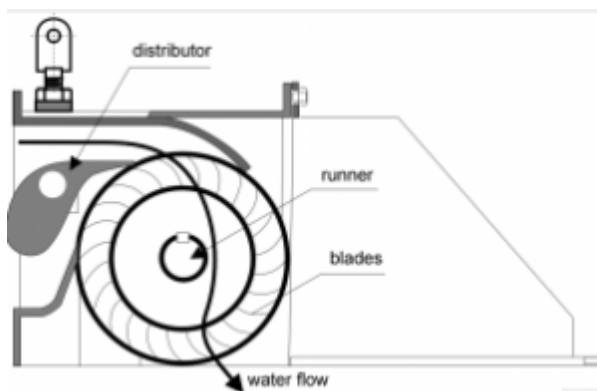


Figura 2.6. *Turbina de flujo cruzado*

La turbina de flujo cruzado (también conocida como Banki u Ossberger[]) es un tipo de turbina que compensa un menor rendimiento, comparándolo con las anteriores, manteniéndolo plano durante un mayor rango de funcionamiento. Esto es importante pues mientras una gran presa puede disponer de varios generadores a los cuales hace funcionar en su punto de funcionamiento óptimo(en el caso de la turbina Francis), abre o cierra compuertas en función de la demanda, solo dispongo de uno y su rango de funcionamiento tiene que garantizar una eficiencia aceptable en cualquier situación. Otro tema del que hay que hablar es del mantenimiento. El hecho de que el flujo la atraviese en diagonal, permite que no se almacenen impurezas (ramas) entre los álaves, reduciendo las tareas de mantenimiento, quedándose exclusivamente en el engrasado anual de los rodamientos. También es bueno destacar que su precio es menor, debido a su diseño compacto. Estas máquinas se hacen a mano por artesanos. La que se dispone pudo costar 9000 euros. Una francis, funcionando en su punto de mayor rendimiento obtiene eficiencias que pueden alcanzar el 90%, pero en cambio puede tener un coste en torno a los 20000 euros por el mismo artesano, pues es más compleja de construir. En cualquier caso son turbinas que bien construídas pueden funcionar durante décadas, por lo que si que es bueno el contratárselas a algún experto especializado en estas.

2.3 Sistemas de micro-generación eléctrica

Dentro de lo que viene siendo la generación, cuando se opera una pequeña red sin estar conectado a la red nacional, se puede plantear el equipo básicamente de dos formas:

-Como un equipo de cogeneración: A partir de una válvula regulas un combustible, con el que entregas más o menos potencia al sistema eléctrico, en función de las necesidades del usuario que disfruta del equipo.

-Aprovechando un recurso renovable, que en la mayoría de ocasiones es viento o radiación solar, apoyándose en baterías que almacenan la energía cuando se genera y permiten al usuario utilizarla cuando la necesite.

Un recurso hídrico tendrá un comportamiento intermedio, pues ni es tan fácil de regular su caudal como en un equipo de cogeneración, ni es tan impredecible como el viento o la luz solar.

2.3.1. Recurso incontrolable

Utilizando imanes permanentes y acumuladores

Cuando se requiere aprovechar mejor el potencial del agua, existen trabajos que adaptan los equipos de generación eólica autónoma. Conectan sin necesidad de correa una máquina de imanes permanentes, que pueden girar a menor número de revoluciones la turbina, con un variador de frecuencia se transforma en continua y conecta directamente al acumulador de donde obtienes electricidad. Como se ve puede ser viable el hacerlo así. El agua sufre estiajes, en muchas ocasiones es un recurso incontrolable y además se pueden encontrar empresas [8] que te realicen el montaje, por lo que no tienes que buscarte a ningún particular que te desarrolle el sistema eléctrico. Es más caro, pero es una tecnología que actualmente se está desarrollando, por lo que evita complicaciones.

No obstante, una máquina de imanes permanentes, es muy sensible y va a requerir de baterías y variadores de frecuencia para hacerla funcionar. Generar corriente alterna directamente a partir de esta, de forma autónoma implica riesgos:

-No se puede desexcitar la máquina. Ante pérdida de carga, gira provocando sobretensiones que pueden dañar los aislamientos y al resto de elementos.

-Ante cortocircuitos, existe un riesgo de debilitar el campo de los imanes y eso obliga a desechar la máquina.

En el caso de estudio, se considera que no sale rentable, pues aparte de ser más caras son empresas que venden el equipo completo (turbina + generador). Además el

trabajo se empezó a plantear de una forma. El querer cambiarlo, implica realizar modificaciones a lo ya hecho, con los correspondientes sobrecostos que eso conlleva.

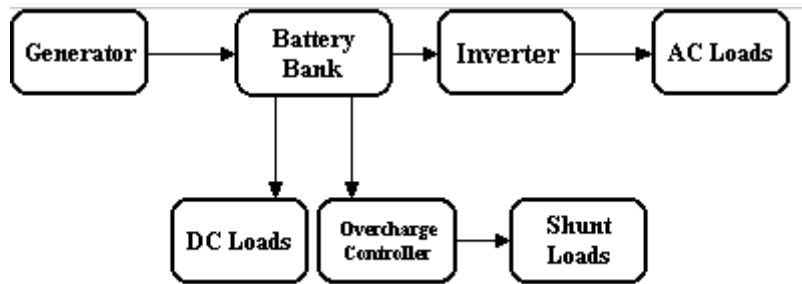


Figura 2.7. Ejemplo básico de cómo se puede plantear un equipo utilizando baterías, con una máquina de imanes con su inversor. El shunt equivale a una carga auxiliar que se utiliza cuando la batería está completamente cargada para evitar pérdida de carga.

Se encontró una empresa española, a la que se preguntó por un presupuesto, obteniéndose lo siguiente:

Concepto	Cantidad	Importe Unitario	Subtotal
Equipo de turbinado para carga de baterías			
Generador eléctrico trifásico, clase de protección IP55. Potencia de 5,5 kw a 3000 rpm. No incluye acoplamiento turbina-generador.	1 ud.	813,40 €	813,40 €
Cuadro de control de la microturbina compuesto por regulador de carga para baterías de 48V, cuentahoras y piloto indicador de marcha. Montaje sobre cuadro metálico para instalación mural de dimensiones 600x600x210mm, IP66. Incluso autotransformador trifásico IP23.	1 ud.	2779,60 €	2779,60 €
Banco de baterías de 48 V y 110 Ah de capacidad, compuesto por 4 baterías tipo AGM de ciclo profundo libres de mantenimiento de 12V y 110Ah de capacidad unitaria.	1 ud.	1149,88 €	1149,88 €
Inversor monofásico 230V y 50Hz de onda senoidal pura de 5000W de potencia nominal y hasta 10000W de potencia pico. Alimentación a 48VDC, incluso cableado de conexión a baterías.	1 ud.	2276,59 €	2276,59 €
TOTAL:			7019,46 €
IVA (21%):			1474,09 €
TOTAL+IVA:			8493,55 €

Figura 2.8. Presupuesto que fue ofrecido.

A todo esto, hay que añadir adaptar la correa de distribución al número de pares de polos de la nueva máquina y el transporte, por lo que el sistema eléctrico puede tener el mismo precio que la propia turbina.

2.3.2 Recurso controlable

Plantear el trabajo como si fuera un equipo de cogeneración, en donde se regula un caudal de entrada, supondrá una serie de problemas, pues no es tan fácil de regular.

-Para regular el agua se tiene que embalsar antes. En este caso se puede, pues se utiliza una infraestructura que ya existía. Pero en la mayor parte de los casos en los que se pueda dar provecho a este tipo de recurso, si se quiere almacenar el agua, va a existir un impacto ambiental. Si bien una empresa puede asumirlo y puede de una forma u otra compensarlo, cuando eres un particular eso es más complejo.

-Aunque se pueda almacenar agua y regular su caudal entrante, lo que no se puede hacer es adaptar el caudal de agua con el consumo eléctrico que se tiene en un domicilio en todo momento. Es por ello que el apoyo de una red eléctrica o el uso de acumuladores del anterior apartado, no es mala opción. No obstante, aunque sea más laborioso y obligue a disipar gran parte de la energía, se puede adaptar la demanda energética con la suministrada por el generador. Esto se consigue mediante una carga auxiliar en donde se disipa el excedente generado.

Para este tipo de regulación autónoma se utilizan las máquinas eléctricas tradicionales, que puede ser la máquina síncrona de cogeneración monofásica aunque además de esta, hay trabajos en los que se consigue generar electricidad a partir de máquinas de inducción.

2.3.2.1. Comparativa entre jaula de ardilla y máquina de inducción

Lo primero que puede llamar la atención es por qué se pretende utilizar una máquina de jaula de ardilla como generador, frente a una síncrona, que es utilizada de forma tradicional, y que tiene mayor tradición en la industria como generador. Hay trabajos en internet, que defienden el uso de esta máquina por debajo de los 20 KW. Coinciden en lo mismo:

-La principal ventaja está en que es una máquina robusta. Dispone de un rotor sencillo, lo que no sólo le proporciona ventajas en cuanto a un menor precio sino que también la ausencia de componentes eléctricos como escobillas o diodos permiten un menor mantenimiento y una eliminación de complicaciones y fallos que pueda ocasionar. El único mantenimiento que requiere es engrasar los rodamientos dos veces al año.

-Es un producto maduro. Existe desde hace más de un siglo y ocupa el 90% de la industria, lo que permite facilidad en su obtención, mejor precio y facilidad de encontrar en su búsqueda en catálogos. Se añade, que según los estándares IP que garantizan aislamiento frente al medio, no se fue capaz de encontrar un IP elevado (protección frente a humedad y polvo) en catálogo para un generador síncrono, que si que tiene la máquina que se pretende utilizar. Se añade que las máquinas síncronas monofásicas están diseñadas para equipos de cogeneración, lo cual hace que tengan pocos pares de polos y obliguen a mayores reducciones en la correa de distribución.

-Protección frente a fallos: Ante cortocircuitos, la máquina se desexcita, impidiendo que estos perjudiquen al resto de dispositivos. Uno de los problemas que puede darse es que ruede el rotor a demasiada velocidad ante una pérdida de carga. Esto más allá de fallos mecánicos, en máquinas síncronas si no se pierde la excitación, pueden aparecer sobretensiones que causen fallos en los elementos conectados. La excitación de la máquina de inducción es externa a la máquina, lo cual facilita el diseño de las protecciones.

-Tiene fácil regulación. Gracias a todo el desarrollo de la electrónica de potencia, se puede conseguir un control en la máquina, facilitándose una tensión estable para el usuario.

Por el contrario, tiene un peor rendimiento: Es una máquina que induce corrientes dentro del rotor en el entrehierro por girar a distinta frecuencia que el campo. Esto supondrá siempre peor rendimiento, pero para la aplicación pretendida, en la que no hay problemas para refrigerar y se tiene un excedente de energía, se puede considerar que es mejor, atendiendo a todas las ventajas mencionadas.

2.3.2.2. Máquina de inducción autoexcitada

Una cuestión importante en esta máquina es el hecho de que no nos interesa que aparezcan transitorios. Esto es un generador, que está movido por un recurso que no puede variar bruscamente que es un caudal de agua. Si se quiere mantener constante la velocidad del rotor, se busca su funcionamiento en régimen estacionario. De aquí que se pueda usar el circuito equivalente para explicar su funcionamiento

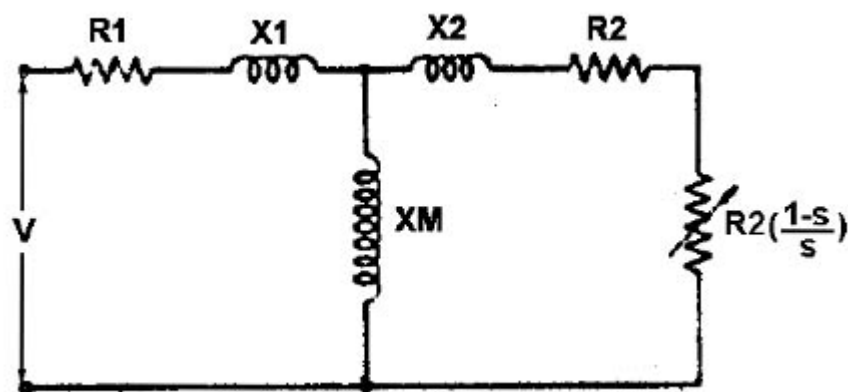


Figura 2.9. Modelo del circuito equivalente. Si despreciamos los efectos de las inductancias de dispersión y de las pérdidas en cobre, se observan los dos elementos protagonistas en la máquina. La inductancia mutua (que consume la mayor parte de la reactiva) y la carga del rotor (al ser el deslizamiento negativo, su valor será negativo y nos entregará potencia).

Este modelo nos permite plantear esta máquina de forma parecida a como funciona una dinamo con la excitación dependiente. A partir de una remanencia magnética, se consigue una variación de flujo, que permite una diferencia de tensión en los bornes del estator.

Requiere de un consumo de reactiva para su propio funcionamiento tanto como motor como generador. Como la forma más conocida de entregar esa reactiva es por medio de una red eléctrica, esto limita mucho su uso como generador cuando no se tiene conexión con esta. Una forma de obtener esa reactiva es mediante condensadores, que por medio del fenómenos de la autoexcitación, son capaces de entregarla, magnetizando el rotor y consiguiendo que aparezca esa diferencia de tensión en los bornes del estator. El principal problema viene a la hora de regular, pues ante variaciones de la carga, y sobre todo en situaciones en las que se demande un elevado consumo de reactiva (arranque de un motor, conectado a los bornes de este generador), pueden ser requeridos condensadores con una capacidad diferente a la utilizada, obligando a complejos sistemas de regulación en donde se conmutan condensadores, que hacen compleja una regulación fina de la reactiva. Se plantea en 3.3.3. como con una electrónica más elaborada se puede conseguir un control más preciso, por medio de los compensadores estáticos.

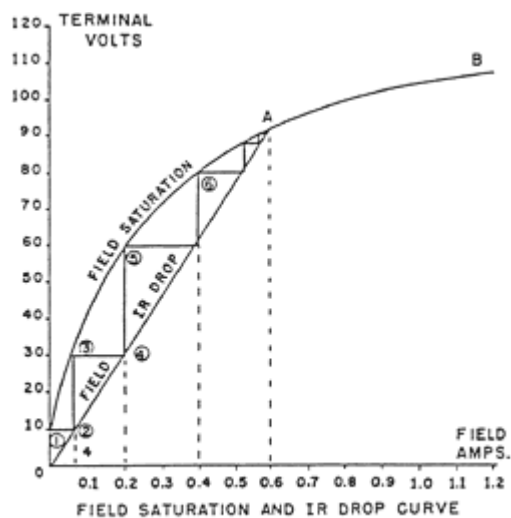


Figura 2.10. *Proceso de autoexcitación en máquinas de inducción.*

Existe un riesgo de desmagnetización, ante cortocircuitos o ante situaciones en las que haya una gran demanda de potencia reactiva, funcionando de forma similar al proceso de magnetización. Para ello se plantean dos pequeñas simulaciones. En la primera se conecta una pequeña carga inductiva, que varía la tensión y frecuencia en régimen permanente. En la segunda, se conecta una carga inductiva con un valor similar a L_m . Llegándose a desmagnetizar completamente la máquina. Se ha cogido la máquina del modelo de simulink con curva de saturación de 7.5 KW de potencia nominal. Conectadas a unas resistencias que absorben una potencia activa de 6,5 KW.

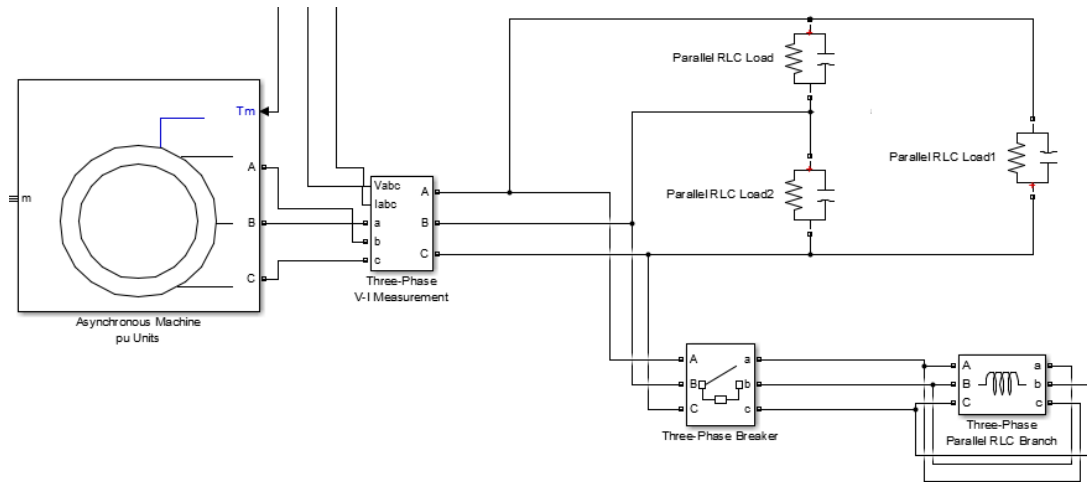


Figura 2.11. Máquina autoexcitada con la carga resistiva y los condensadores de autoexcitación conectados en triángulo. Posteriormente se conecta la carga inductiva que debilita el flujo.

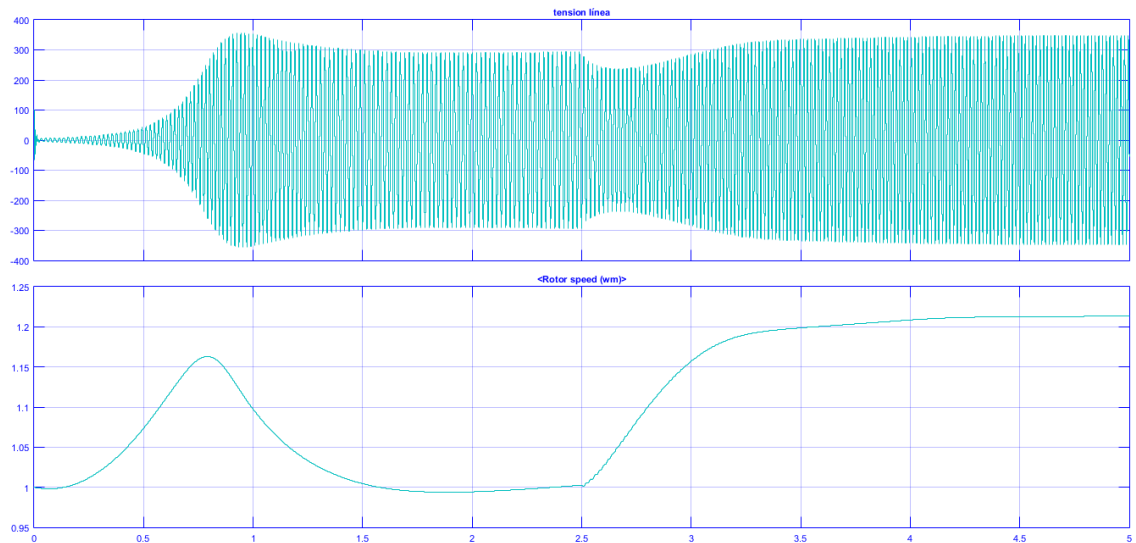


Figura 2.12. Primera simulación: Tras el proceso de autoexcitación, y tras estabilizarse la tensión, se conecta una carga inductiva, que debilita a la red y cambia el punto de equilibrio.

Se ha medido la amplitud y el periodo de las ondas una vez se estabilizan. En el caso inicial se disponían de 227 V eficaces, con una frecuencia de 52 Hz. Tras la adición de una reactancia de un 25% de la inductancia mutua de la máquina se obtuvo 245 V eficaces y 60 Hz. Queda claro, que aunque se mantenga la carga resistiva constante, se requiere de algún elemento que sea capaz de equilibrar esa reactiva en situaciones que varíe. Si se quiere la tensión y frecuencia deseada.

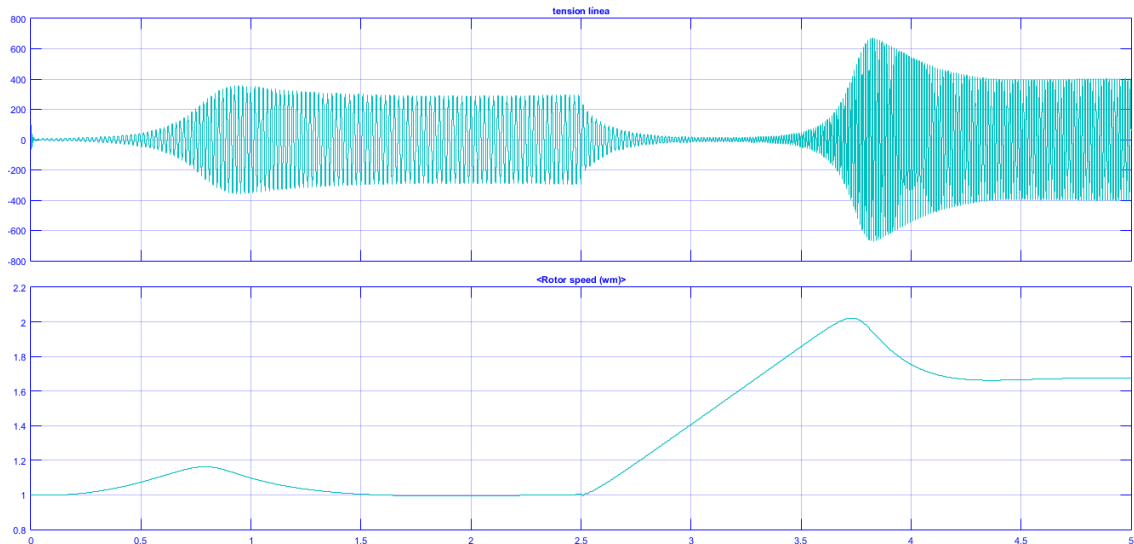


Figura 2.13. Simulación en donde el efecto inductivo provocado por la carga logra desmagnetizar la máquina. Esta es una situación indeseable, pues se pierde control.

En esta segunda simulación se observa cual es el mayor problema de esta máquina. La posibilidad de desmagnetizarse. Mientras que en el caso anterior una pequeña inductancia, lo único que conseguía era variar el punto de equilibrio, en este segundo apartado, una gran carga inductiva (del mismo valor que la inductancia mutua) desmagnetiza la máquina. Esto es claramente indeseable, pues se alcanza una situación en donde no se sabe como va a actuar la máquina. Existe la posibilidad de que quede algo de flujo remanente, y consiga excitar la máquina girando a mayores revoluciones. Los condensadores son capaces de entregar más reactiva a mayor velocidad de giro, mientras que las cargas inductivas aumentan su impedancia. Esta segunda excitación es cuanto menos indeseable, pues puede provocar sobretensiones. Las corrientes que se inducen en el rotor, cuando este gira por encima de la velocidad de sincronismo, provocan sobretensiones en cuestión de décimas de segundo. Pudiendo provocar fallos en otros elementos. Por suerte el hecho de que la excitación de esta máquina esté situada fuera del rotor permite una actuación más fácil de las protecciones.

Destacar que se termina alcanzando otra situación de equilibrio, si bien es de destacar que no interesa perder el control sobre el generador.

Ante embalamiento, es necesario que existan protecciones de sobretensión que desconecten los condensadores. Es una máquina robusta, por lo que el giro a mayor velocidad puede soportarlo y la turbina entra en pérdidas. No obstante, que aparezcan sobretensiones en un elemento conectado a la casa, puede provocar la avería del resto de electrodomésticos.

2.3.2.3. Sistemas de gestión generación/carga

2.3.2.3.1 Carga auxiliar

Independientemente de que se utilice una máquina síncrona o una asíncrona, el hecho de que pueda variar tan bruscamente la demanda, implica la necesidad de usar una carga auxiliar.

Este es el principal problema de estar aislado, estás forzado a adaptar la potencia eléctrica demandada con la potencia eléctrica generada. Aunque pueda parecer fácil si se piensa en equipos de cogeneración que utilizan combustibles fósiles, el agua no tiene esa facilidad para ser controlada. En grandes centrales hidráulicas, adaptan la producción a una demanda energética que tiene una variación lenta, del orden de minutos. El consumo que se pretende obtener, puede perfectamente doblarse en un tiempo de milisegundos que es lo que dura un periodo de onda eléctrica. Variaciones tan bruscas de la carga demandada suponen variaciones en el par eléctrico de la máquina y como consecuencia de esto pueden producirse variaciones de la velocidad de giro del rotor y de la frecuencia de la red. Ante estas situaciones aparece un problema complejo de resolver, si no se quiere desperdiciar energía (volantes de inercias, reguladores más bruscos). Es por ello que la solución más sencilla y económica a este problema es el uso de una carga auxiliar que sirva de lastre y así mantener la potencia consumida constante o por lo menos con capacidad para variar de manera más suave.

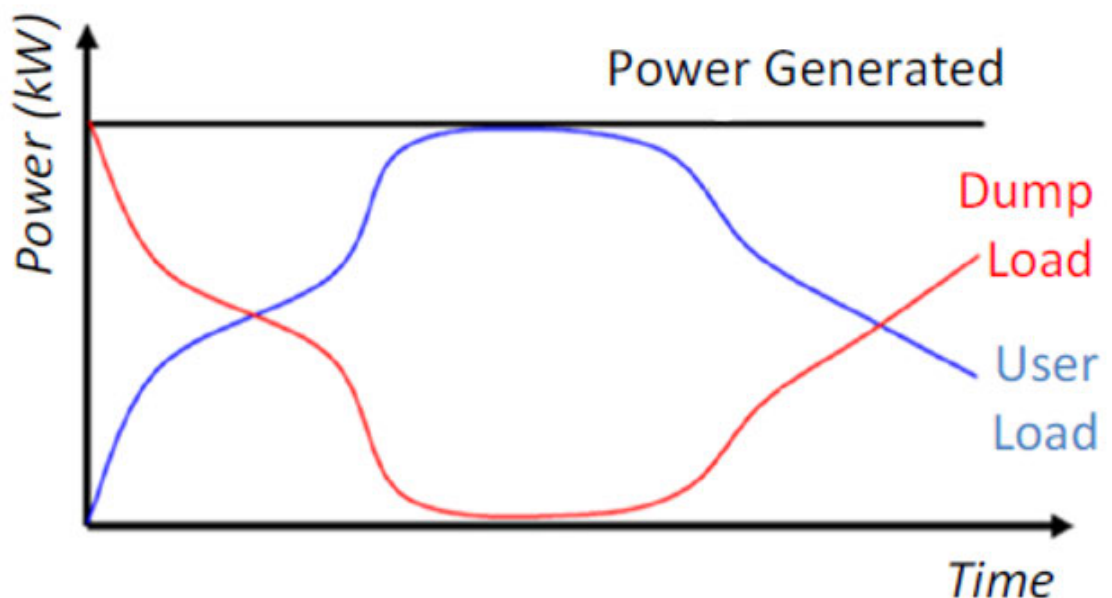


Figura 2.14. Relación de potencias: La generada se mantiene constante para mantener estable la frecuencia. Como el usuario puede variar la potencia que consume de forma libre, es importante, el adaptar rápidamente el excedente por medio de una carga regulable de forma electrónica.

Haciéndose un símil con lo que es un coche sería como controlar la velocidad manteniendo el acelerador pisado a fondo en todo momento y variando la presión sobre el pedal del freno. No existe otra opción. Es igual disipar energía en una cascada que en una resistencia auxiliar. En la red nacional, por la noche cuando sopla el viento, los aerogeneradores disipan la energía porque no hay una demanda, e incluso los ascensores no devuelven esa electricidad que generan a la red en su funcionamiento rutinario, porque económicamente no sale rentable.

Se debe indicar que para cualquier aplicación de este tipo, que no está conectada a la red por debajo de 200-500 KW es como se resuelve el problema.

De aquí pueden surgir ideas más elaboradas, como por ejemplo usar el termo del agua o la propia calefacción de la casa como lastre tratando de suavizar esa demanda tan brusca que tiene un hogar, para que así no se desperdicie energía, disipándola en forma de calor útil. Se pueden plantear trabajos más elaborados con el uso de sistemas híbridos con acumuladores. Pero de momento, se usará una carga lastre, pues es la solución más sencilla.

Esta para su correcta refrigeración, requerirá de estar sumergida en agua para así disponer de convección natural aunque también se puede refrigerar por convección forzada, mediante ventiladores.

Gracias a la electrónica, se puede realizar un lastre cuya carga sea graduable de forma fácil con una lógica de control sencilla. En función de si se usan triacs o transistores se puede realizar de dos formas:

2.3.2.3.1.1. Triacs

Que son elementos semicontrolables, que permiten el paso de corriente una vez reciben una señal de encendido y se cierran en cuanto esa corriente sea nula. Situando varias cargas en paralelo, de valores de resistencia cada cual el doble que la carga anterior, y activar los que sean necesarios cuando la señal pasa por cero, se puede conseguir esa regulación de la carga sin incluir armónicos debidos a ángulos de desfase.

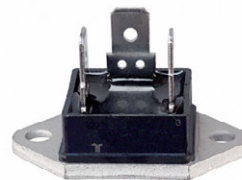
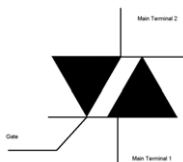


Figura 2.15. Triac de potencia. El conector (gate) que es diferente a los otras, se utiliza para establecer la señal de control.

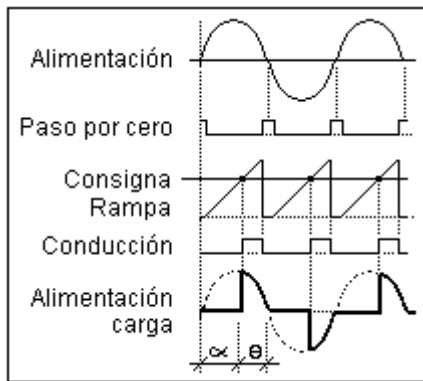


Figura 2.16. Ejemplo de regulación, cambiando el ángulo de desfase. Este tipo de regulación, permite establecer un regulador proporcional integral, cuya dinámica sea rápida. De 10 ms, que es el semiperiodo de una onda eléctrica.

Otra forma de regulación mediante triacs y con una única carga consiste en activar los tiristores en un determinado porcentaje de ondas completas. Este segundo método, aunque introduce distorsión armónica, obtiene una regulación más rápida.

En el caso de la figura, se regula cada 100 ms, por lo que la respuesta va a ser más lenta que en el caso anterior.

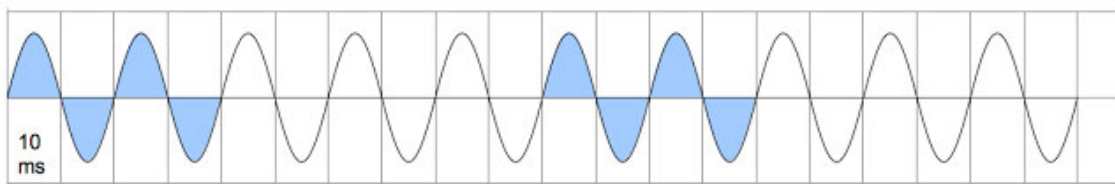


Figura 2.17. Ejemplo de regulación, seleccionando solo algunas de las ondas. Cogido de <https://www.sites.google.com/site/hydrocontrol1/>

También hay trabajos que establecen diferentes cargas escalonadas, de valor óhmico cada una la mitad que la anterior (**figura 2.18.**), que evitan esa distorsión con ángulos de desfase nulos. Pero estos métodos implican conectar una gran cantidad de resistencias

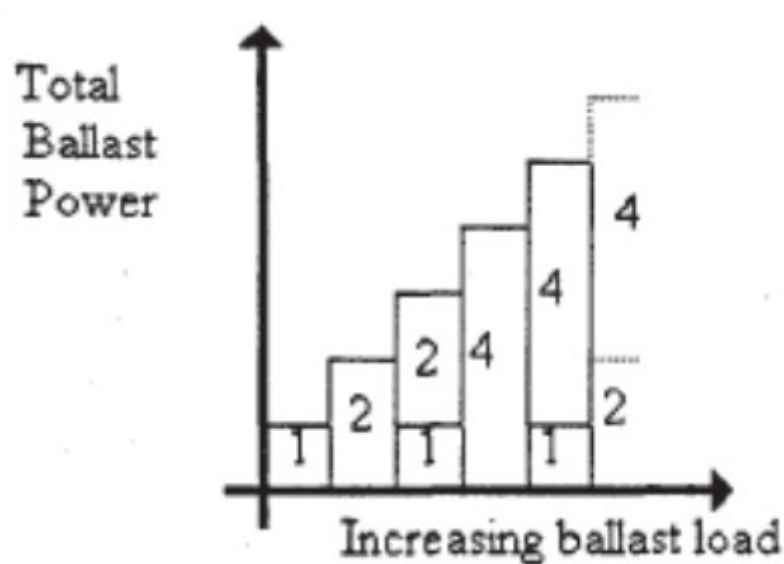


Figura 2.18. Regulación con diferentes cargas resistivas en paralelo se puede realizar una carga que varía la potencia que consume de forma escalonada.

2.3.2.3.1.2. Transistores

Rectificando la onda eléctrica se puede recortar posteriormente con un chopper. La señal de entrada al chopper es muy fácil de realizar y se obtiene a partir de una onda portadora (diente de sierra) y una moduladora (porcentaje de carga requerido) que mediante un comparador obtienen un tren de pulsos con lo que se consigue esa regulación fina de la carga de nuestra red, y sin presencia armónica.

Comparado con los triacs, se obtiene una respuesta muy rápida, 10 ms, que es graduable, y que introduce una distorsión de varios KHz, por lo que es fácilmente filtrable.

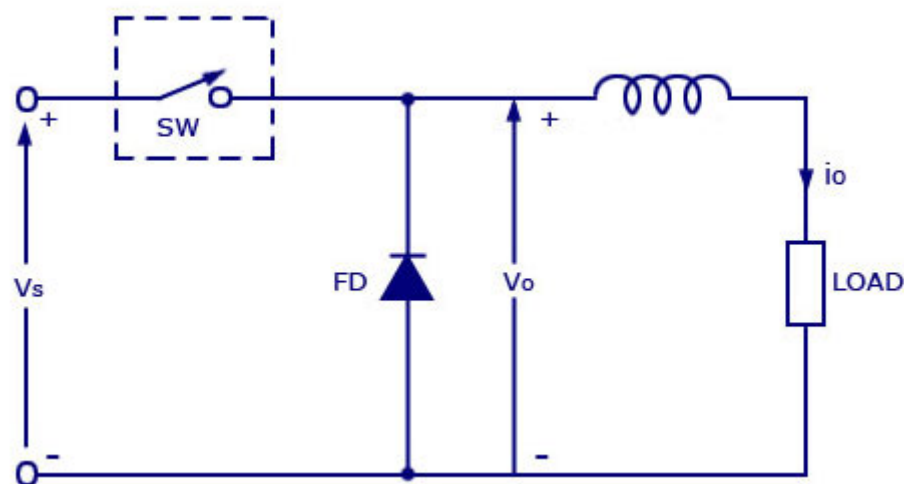


Figura 2.19. Este sería el esquema de nuestro regulador de activa, un puente rectificador de diodos nos permiten obtener una corriente continua. Un transistor (MOSFET o IGBT) es un elemento activo que nos permite regular la carga que observa

nuestra red. También se añade un diodo de recirculación para evitar corrientes parásitas que pudieran estar asociadas a esta resistencia.

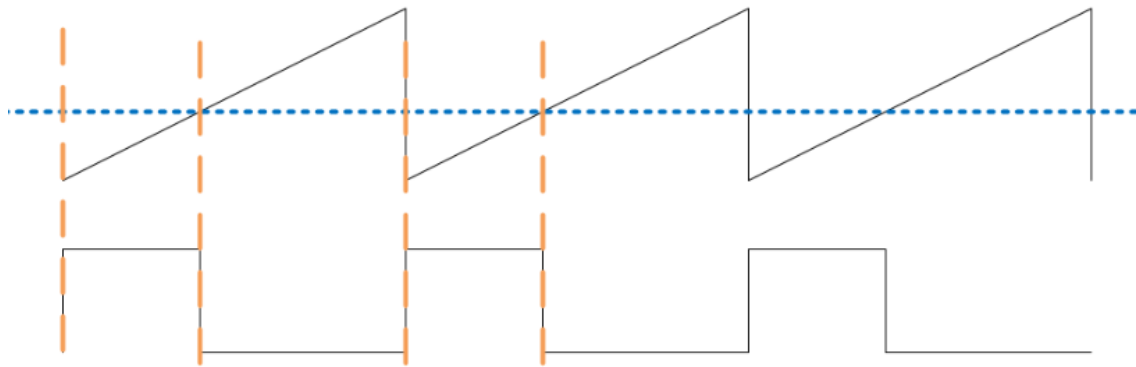


Figura 2.20. Onda portadora (señal diente de sierra) y onda moduladora (señal que indica porcentaje de la carga) son comparadas y generan la señal que controla el transistor.

La parte de control se puede realizar mediante electrónica digital, utilizando operacionales, condensadores y resistencias se pueden establecer los PI que regulan estos elementos. No obstante, si se quiere tener una mejor adaptabilidad (por ejemplo cambio en los valores de los reguladores PI) resultan mejor alternativa los microcontroladores, que no requiere de diseñar las plaquitas y de establecer sus elementos sobre ella.

2.3.2.3.2 Compensador

En los trabajos más avanzados que aparecen en internet [], además de tener control sobre la potencia activa, buscan regular la potencia reactiva de forma que se pueda hacer funcionar el generador con distintos grados de excitación, para tener un mejor control sobre la tensión y la frecuencia, en una máquina síncrona, la tensión viene dada por un flujo de excitación que es debido a las corrientes del rotor. En una la jaula de ardilla esa excitación viene dada por la reactiva.

La amplitud de la tensión se regula variando la corriente reactiva que entra en la máquina, como ocurre en las redes eléctricas. Tradicionalmente se realiza con condensadores por medio del fenómeno de autoexcitación. Pero las redes eléctricas también utilizan electrónica de transistores, para conseguir regulaciones más ajustadas. En concreto, se puede observar que cerca de granjas eólicas cuyos molinos mueven máquinas de inducción, se utilizan puentes de IGBTs, conectados exclusivamente a condensadores dieléctricos, sin entregar potencia activa al condensador. Son los **compensadores síncronos estáticos** y si las redes eléctricas de alta tensión son capaces de usar este tipo de elementos para su regulación, se tratará de demostrar por medio de simulaciones que en nuestra máquina autoexcitada se puede regular con esta electrónica. En baja tensión, los puentes de IGBTs son utilizados en los inversores que transforman la corriente continua en alterna, son bidireccionales y conmutan a alta frecuencia, por lo

que tras un filtrado permiten obtener una onda sinusoidal perfecta. Permiten una regulación muy fina y muy rápida de la corriente gracias al control por histéresis por lo que parecen adecuados para la aplicación. Así que se utilizará la **electrónica de los inversores**, pero no para almacenar la energía potencial del agua en baterías, sino para dar regulación de la reactiva. Ya se ha comentado con anterioridad que hay otros métodos para obtener esa regulación, como puede ser la conmutación de condensadores. Pero si lo que se quiere es una regulación fina y rápida, es mejor el uso de IGBTs. Estos son más caros, son menos eficientes y requieren de ingenieros especializados para su diseño, pero permiten un control muy preciso de la intensidad y compensan esos problemas que puedan acarrear. Debe destacarse, que pueden entregar la misma potencia reactiva en todo momento, impidiendo la desmagnetización.



Figura 2.21. Ejemplo de compensador estático utilizado en redes eléctricas: Se pueden ver sus distintos componentes como pueden ser los bloques con los módulos de IGBTs (cajas blancas), su sistema de refrigeración para evitar temperaturas excesivas y los transformadores con los que se conecta a la red y que adaptan la tensión a aquella que sea más adecuada para el funcionamiento de la electrónica. Imagen obtenida de ABB.

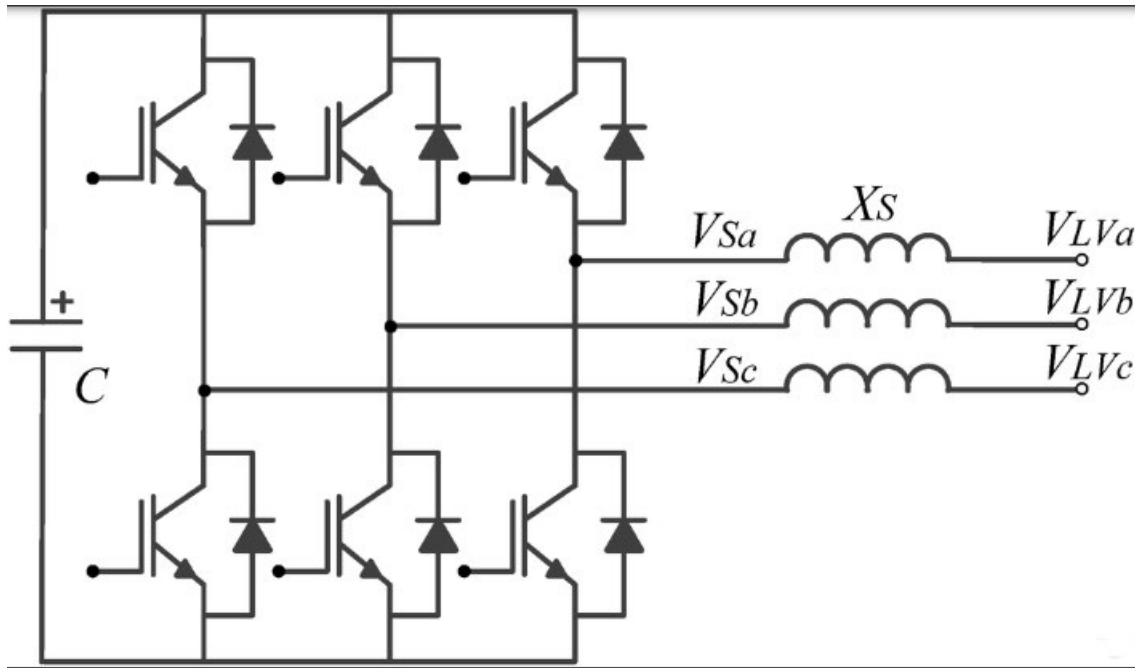


Figura 2.22. Esquema de un compensador estático: Condensador dieléctrico con la diferencia de tensión del bus de continua. Se añaden además filtros que protejan al condensador y a la electrónica de la red.

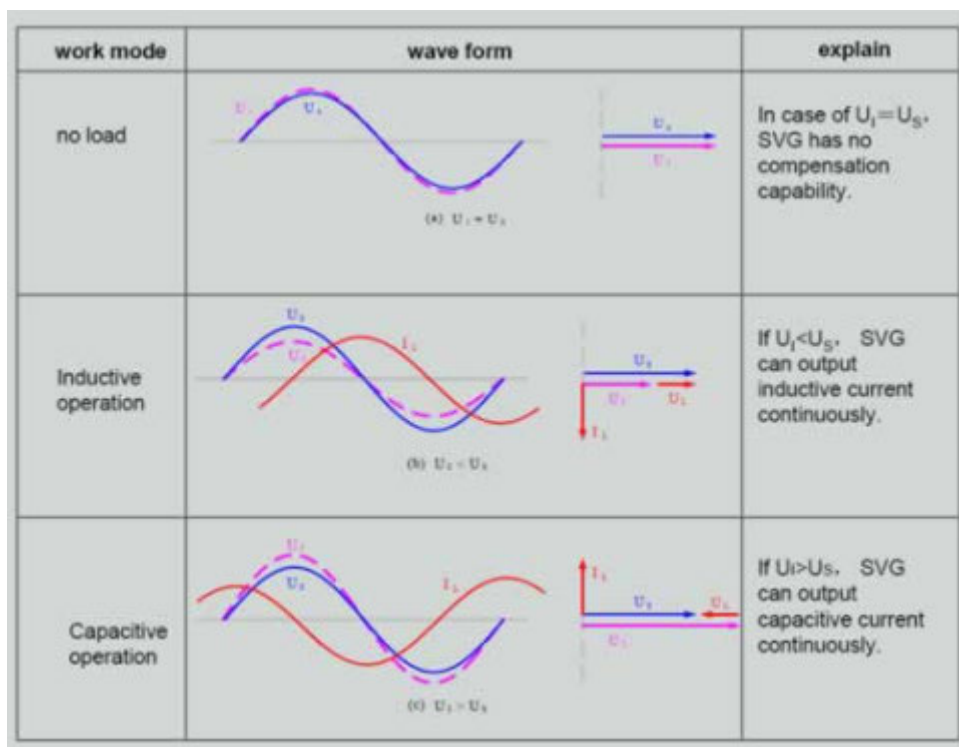


Figura 2.23. En función de la tensión del inversor, este actúa entregando o absorbiendo reactiva. Importante destacar que para entregar reactiva se necesita que la tensión del condensador esté por encima de cierto valor. De lo contrario no conseguirá formar una onda de amplitud elevada.

La regulación se plantea en el apartado de simulaciones y es por bandas de histéresis, las cuales permiten tener un control muy fino de la intensidad.

El hecho de controlar la intensidad tomando como referencia la tensión, permite establecer flujos de potencia. I_d representa a la potencia activa que carga el condensador e I_q representa la potencia reactiva que el convertidor entrega a la red y que permite elevar su tensión. Como ya se dijo, entregar reactiva implica entregársela al generador, lo cual implica inducir corrientes en el rotor de la máquina, responsables de un mayor flujo y por tanto una mayor tensión.

$$P = \frac{3}{2} \cdot (U_d \cdot I_d) \quad P \equiv I_d$$

$$Q = \frac{3}{2} \cdot (-U_d \cdot I_q) \quad Q \equiv -I_q$$

Figura 2.24. Imagen obtenida de los apuntes de control de máquinas eléctricas.

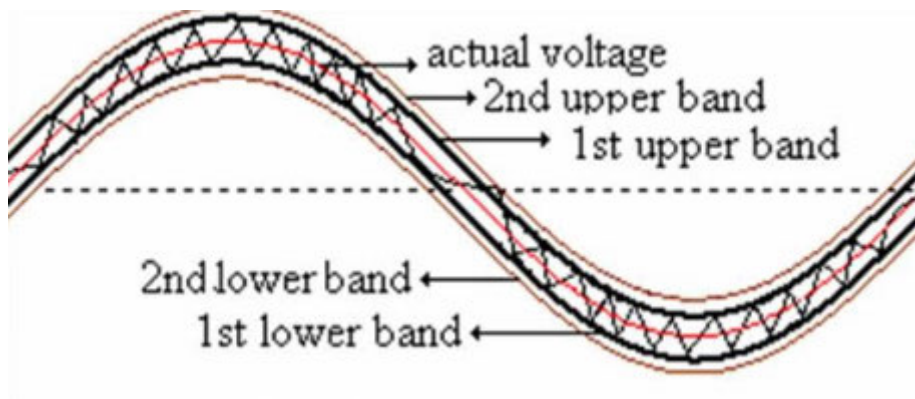


Figura 2.25. Ejemplo de control por bandas de histéresis

Cuando se habló de los elementos de control en la regulación de la carga, se habló de electrónica y microprocesadores. En el caso de la regulación de la reactiva, requiere de control por histéresis con elementos que sean capaces de operar en tiempo real, donde no son permisibles los retrasos. Si antes microprocesadores como el Atmega (ARDUINO) podían regular la carga auxiliar sin problemas, para realizar un control por histéresis se necesita de hardware y sensores optimizados para operar en tiempo real. Es por ello que se requerirán elementos especializados como pueden ser sensores de efecto-Hall y microprocesadores de la familia de los DSPs, que cumplen con las características citadas.

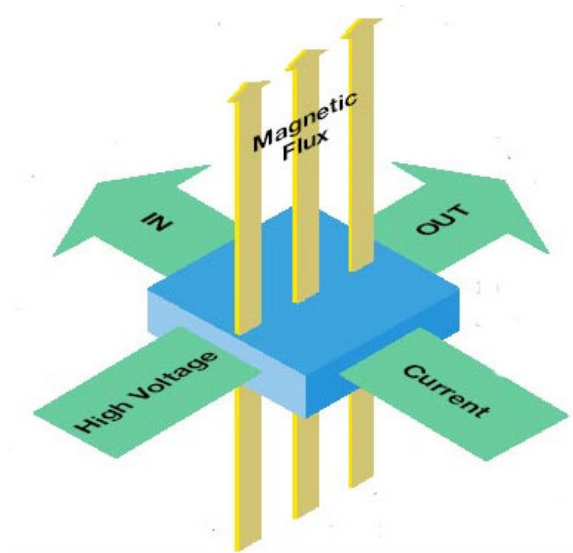


Figura 2.26. Ejemplo de funcionamiento de un sensor de efecto hall, que mide las variaciones de tensión provocadas por una corriente que atraviesa un campo dado.



Figura 2.27. Diferentes sensores de efecto Hall

Sensores de efecto Hall, permiten la obtención de la intensidad en tiempo real, al contrario de los sensores de efectos inductivos, que miden tensión entre los bornes de bobinas (variación de flujo).

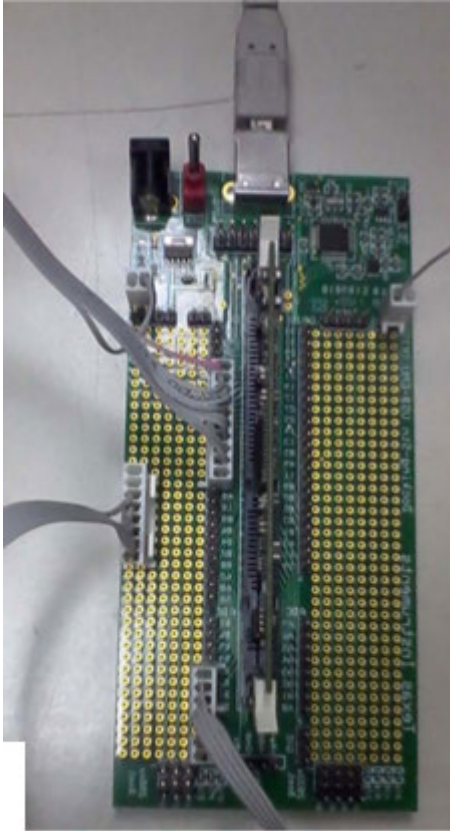


Figura 2.28. DSP C2000 de Texas Instruments, utilizado en Ingeniería en el Departamento de Máquinas Eléctricas de la ETSII

3.- Diseño de la microcentral eléctrica

3.1. Dimensionado energético

Algo bueno del agua es que se adapta a las necesidades energéticas en función de la estación del año. Los veranos suelen disponer de muchas horas de sol y aunque los inviernos puedan ser fríos y húmedos, coinciden con periodos de crecidas con el caudal de agua, por lo que se consigue adaptar generación con consumo.

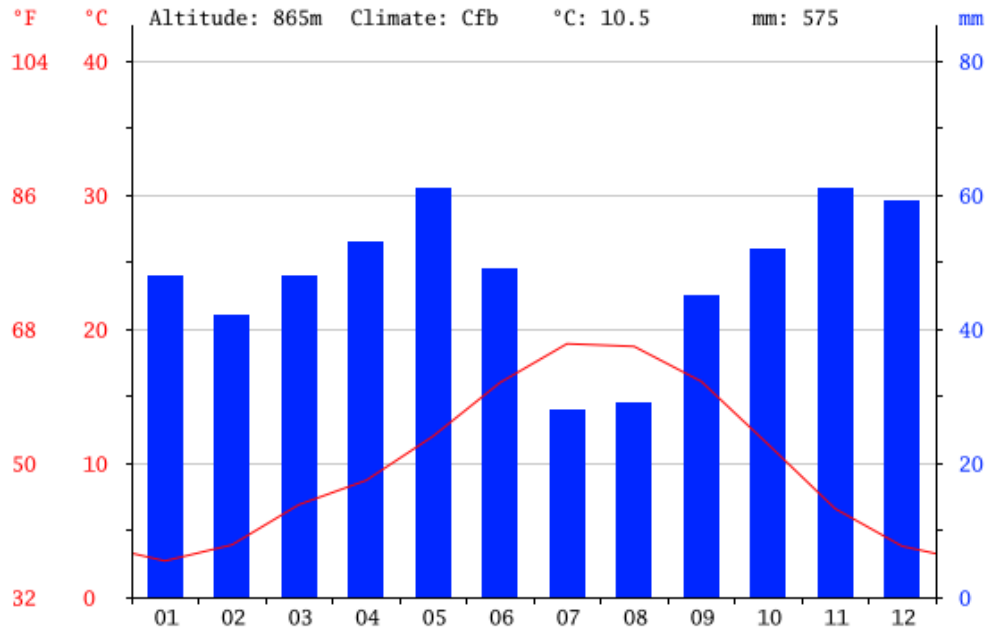


Figura 3.1. Climograma de la provincia de Burgos, meses de verano que no requieren tanta demanda energética tienen un menor consumo eléctrico (clima fresco y más horas de Sol). Meses de invierno (temperaturas más bajas) en donde el consumo es más elevado permiten obtener más energía.

Se debe indicar, que se dispone de una calefacción de hasta 3KW de potencia, que es el elemento que se espera que consuma la mayor parte de la energía, que se adecúa muy bien a la curva citada encima. Después de esta, el siguiente elemento que puede tener un consumo elevado de potencia puede ser la cocina (en torno a 2KW). La calefacción nunca va a funcionar al máximo y eso es lo que nos da la capacidad de regular, combinando la calefacción, con algún electrodoméstico pesado, se tienen que con 4KW, se cubren costes fijos.

Con 4 KW de continuo, una casa tiene energía suficiente para satisfacer su demanda energética en invierno, si se sabe gestionar todos los elementos de los que se dispone de forma eficiente.

El consumo medio de la casa en verano, no llega a los 500 W. Pues es un clima fresco y se realiza mucha vida fuera de la casa, por tanto solo habrá que hacerse cargo de estos picos puntuales que pueden darse de 2 KW, cuando se encienda algún electrodoméstico más pesado. Almacenando el agua en la balsa el resto del tiempo.

Si se disponen de 80l/sg, y 8 metros de altura, para obtener esos 4 KW, nos valdrá conseguir un rendimiento de:

$$\eta = \frac{4KW \cdot 100\%}{80Kg/s \cdot 8m \cdot 9,801m/s^2} = 63,7\%$$

La máxima eficiencia que se puede obtener es con máquina de imanes unido a una turbina Kaplan autoajustable. Sin necesidad de correas, su rendimiento máximo puede ser perfectamente:

$$\eta = \eta_{turbina} \eta_{generador} = 90\% \cdot 95\% = 85,5\%$$

El precio del conjunto turbina más sistema eléctrico puede ser de 28000 euros. 20000 euros es lo que puede costar una turbina Kaplan que mantenga constante la eficiencia a distintos caudales pues necesita de autoajustar sus álabes.

El sistema eléctrico puede llegar a costar unos 8000 euros (véase apartado 2.2). Entre el coste de la máquina de 7,5 KW, la batería, sus dos convertidores de frecuencia, puede tener ese valor. El usar una batería es obligado, pues el no hacerlo implica protecciones costosas.

La turbina de flujo cruzado mantiene en un amplio margen una eficiencia del 80%. Necesita una correa que adapte la velocidad de giro de la turbina al generador (eficiencia entorno al 95%) y las pérdidas en el hierro y en el cobre de la máquina asíncrona (eficiencia al 88% para máquina de 3 pares de polos). Por tanto, el rendimiento global queda entorno al 67% superior al 63,7 que teníamos por objetivo. Por otro lado, sale bastante más económica y con un mantenimiento mínimo.

$$\eta = \frac{80}{100} \frac{95}{100} \frac{88}{100} 100\% = 67\%$$

En cuanto al precio, podría ser, ahorrándose la batería, 9000 euros la turbina y 3000 euros el sistema eléctrico (no hay batería ni imanes ni autotrafos), dando un valor final de 12000 euros. Con este nuevo sistema, perdemos mucha eficiencia, pero sale bastante más económico cada W, en torno a 3 euros, por los 5 euros que propone el otro método. Si el principal uso que se le quiere dar a esta fuente es calefacción, es económico y robusto. Además no requiere de recambios, pues todos los elementos tienen muy buena vida útil.

3.2. Estructura general de la microcentral

En la siguiente imagen se muestra todo el sistema, divididos en balsa, turbina, sistema eléctrico y cargas. Con las distintas interacciones entre los distintos elementos.

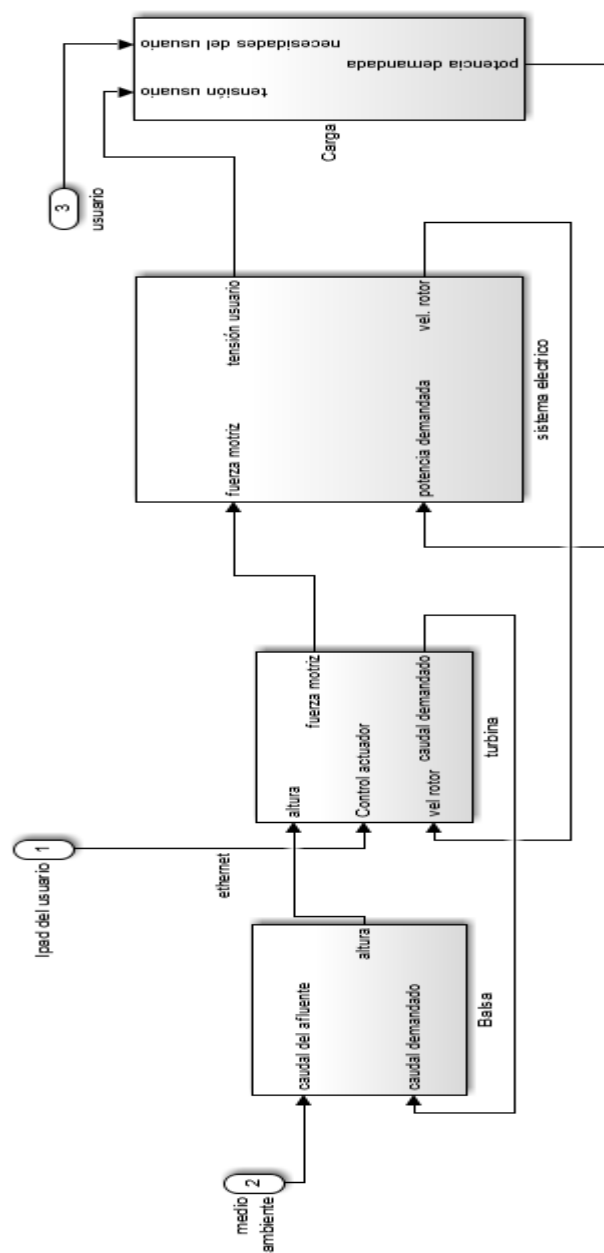


Figura 3.2. Esquema general de toda la planta.

3.3. Diseño del sistema de generación eléctrica

3.3.0. Turbina hidráulica y regulador

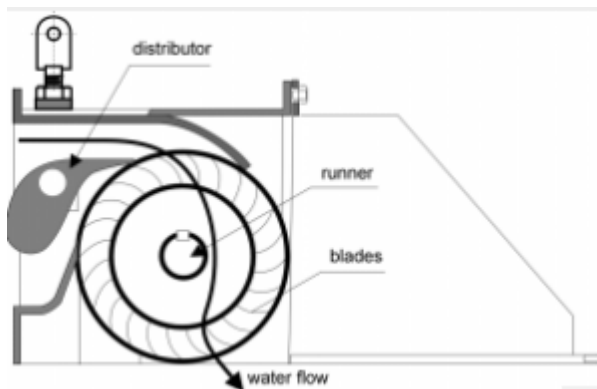


Figura 3.3. Representación de la turbina Banki

Ya está dicho todo en el apartado 2.2 sobre la turbina banki. Construcción robusta y curva plana de rendimiento son sus principales virtudes. Además requiere de poco mantenimiento pues la propia fuerza centrífuga consigue limpiar cualquier impureza (hojas, alguna rama,...) que pudiera colarse dentro del tubo.

Equipo del servomotor para abrir/cerrar el alabe: Se dispone de una máquina de continua, que a partir de los pulsos que atraviesan un puente H es capaz de abrir o cerrar el actuador que regula la entrada del caudal del agua hacia los rodetes.

Ha sido cronometrado y tarda 30 seg. en abrir al máximo el alabe y alcanzar la máxima potencia de generación:

$$80Kg/s \cdot 8m \cdot 9,801m/s^2 \cdot 80\% \cdot 95\% = 4864W$$

Como tarda 30 seg. desde cerrado hasta abrirlo completamente y viceversa, se tiene que la entrada a la turbina es una rampa, pues no puede variar bruscamente, cuya máxima pendiente es:

$$\frac{4864}{30} = 162W/s$$

Por tanto, la potencia que entra a la turbina se compone por rampas de pendiente entre +162W/s y -162W/s

Se ha implementado un controlador externo con una lógica implementada en atmega(ARDUINO), que mide la velocidad de giro del generador y automáticamente cierra el alabe si se sobrepasa una determinada velocidad límite, que se explicará en el tema 3.3.1 de Protecciones. También dispone de Ethernet, lo cual permite conocer el estado de la turbina y el control sobre el actuador de forma remota, sin necesidad de operar en la sala de la máquina. También dispone de una tarjeta SD que almacena cada 5min los datos principales del aprovechamiento (nivel del embalse, velocidad de giro del generador, grado de apertura del alabe, etc).

Conociendo como funciona, se modeliza de la siguiente manera:

3.3.1. Esquema instalación eléctrica (medida, protección y maniobra)

En esto consiste el sistema:

- El generador de tipo jaula de ardilla
- Su sistema externo de excitación, formado por condensadores y por el compensador
- La carga: Formada por las cargas que propone el usuario y las carga que sirven de lastre.

A continuación, se dibuja un diagrama, mostrando todos y cada uno de los elementos que forman lo que es el sistema eléctrico, faltando por añadir los sensores y las protecciones.

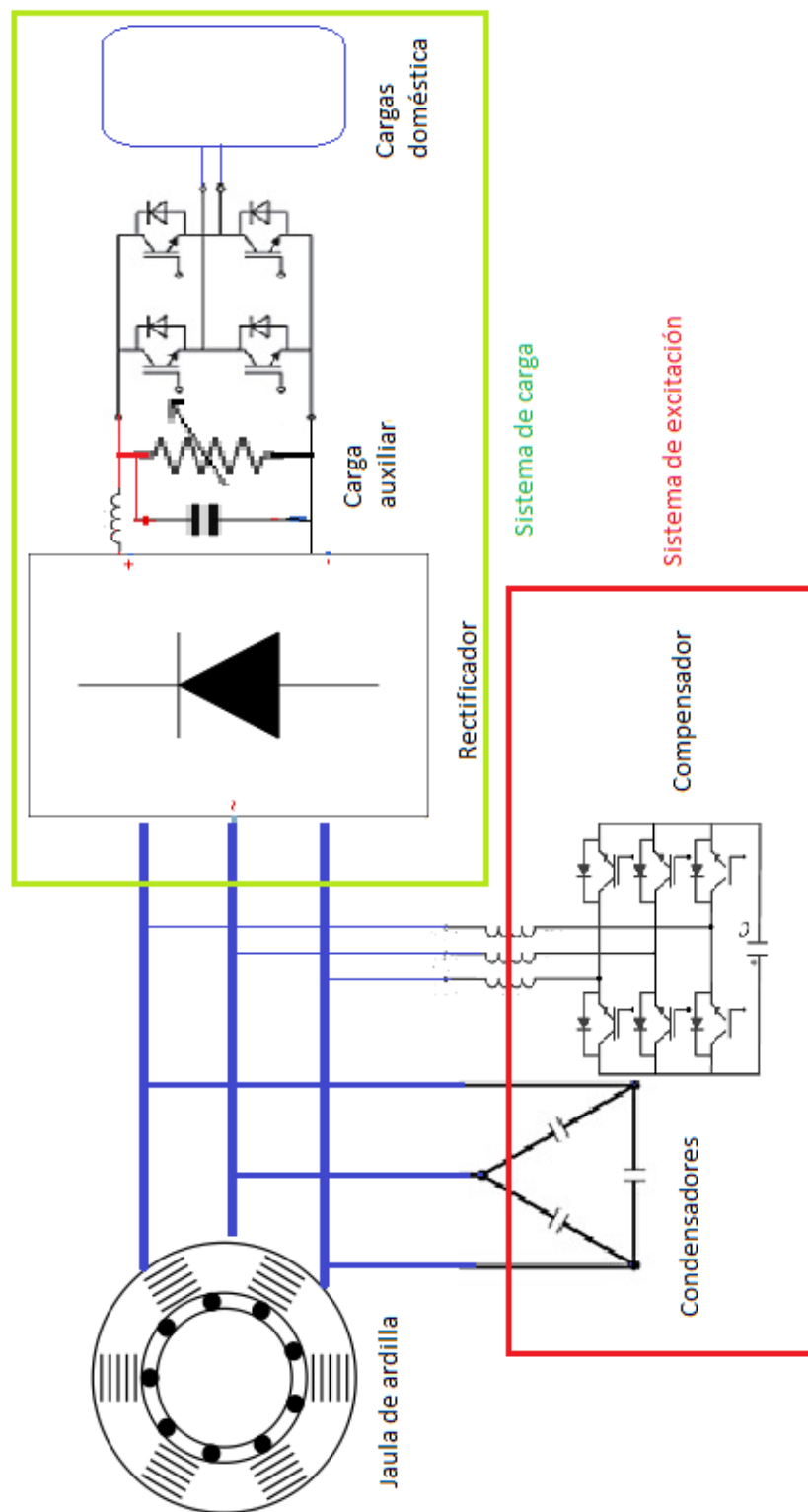


Figura 3.4. Representación esquemática del sistema con todos sus elementos

3.3.2. Generador

Características de la máquina que se plantea usar como generador. Dispone de tres pares de polos. Estos son sus ensayos:

Vacío

Se hace girar sin carga, conectada en estrella y con una tensión de línea de 400 V. eficaces. Se obtiene una intensidad por los bornes del estator de 9.93 A.

$$\frac{U_{ef}}{I_0\sqrt{3}} = 23,24\Omega$$

Que en valores por unidad (pu) es 1,09 pu.

Cortocircuito

Se realiza el ensayo de rotor bloqueado, introduciendo una tensión en los bornes del estator menor (50V de línea), para evitar excesivos calentamientos, obteniendo:

$$P_{cc} = 3I_{cc}^2(R_1 + R'_2) = 1900 W$$

$$Q_{cc} = 3I_{cc}^2X_{cc} = 1900 var$$

$$I_{cc} = 31,5 A.$$

$$X_{cc} = 0,653\Omega$$

Que en pu es 0,03

$$R_1 + R'_2 = 0,641\Omega$$

Que en pu es 0,03

Con

$$R_1 = 0,400\Omega (0,018pu)$$

$$R'_2 = 0,241\Omega (0,012pu)$$

Todos estos datos se introducen en Matlab en el modelo máquina de inducción. Es importante hacer notar, que no se introduce curva de histéresis del inducido del motor, ni pérdidas en el hierro, pues el modelo utilizado no dispone de estas.

SIEMENS

Data sheet for three-phase Squirrel-Cage-Motors



Ordering data: **1LE1001-1DC22-2AA4**

Client order no.:

Order no.:

Offer no.:

Remarks:

Item no.:

Consignment no.:

Project:

U	Δ / Y	f	P	P	I	n	M	NOM. EFF at ... load [%]			Power factor at ... load			I _N /I _N	M _N /M _N	M _N /M _N	IE-CL
[V]		[Hz]	[kW]	[hp]	[A]	[1/min]	[Nm]	4/4	3/4	2/4	4/4	3/4	2/4	I _N /I _N	T _N /T _N	T _N /T _N	
230	Δ	50	7.50	- / -	29.50	975	73.0	87.2	88.0	87.3	0.74	0.68	0.58	4.7	1.9	2.2	IE2
400	Y	50	7.50	- / -	16.80	975	73.0	87.2	88.0	87.3	0.74	0.68	0.58	4.7	1.9	2.2	IE2
460	Y	60	8.60	- / -	16.10	1175	70.0	89.5	90.2	89.6	0.75	0.70	0.60	4.9	1.9	2.2	IE2
IM B3 / IM 1001		FS 160 M		77 kg		IP55		IEC/EN 60034		IEC, DIN, ISO, VDE, EN							

Mechanical data			Terminal box	
Sound pressure level 50 Hz/60Hz (load)	67 db(A)	70 db(A)	Terminal box position	top
Moment of inertia	0.075 kg m²		Material of terminal box	Aluminium
Bearing DE NDE	6209 2ZC3	6209 2ZC3	Type of terminal box	TB1 J00
Bearing lifetime	40000 h		Contact screw thread	M5
Lubricants	Esso Unirex N3		Max. cross-sectional area	16.0 mm²
Regreasing device	No		Cable diameter from ... to ...	19.0 mm - 28.0 mm
Grease nipple	- / -		Cable entry	2xM40x1,5
Type of bearing	Locating bearing NDE		Cable gland	2 plugs
Condensate drainage holes	No		Special design	
External earthing terminal	No			
Vibration class	A			
Insulation	155(F) to 130(B)			
Duty type	S1			
Direction of rotation	bidirectional			
Frame material	aluminum			
Data of anti condensation heating	-/-			
Coating	Special paint finish			
Color	RAL7030			
Motor protection	(A) without (Standard)			
Method of cooling	IC411 - self ventilated, surface cooled			

Figura 3.5. Ficha técnica con los datos del motor

Environmental conditions	
Ambient temperature	-20 °C - +40 °C
Altitude above sea level	1000 m
Explosion protection	
Type of protection	- / -

Figura 3.5. Ficha técnica con los datos del motor

Technical data are subject to change! There may be discrepancies between calculated and rating plate values.

Version: 2014.05
generated: 17.05.2014 01:45:07

3.3.3 Excitación

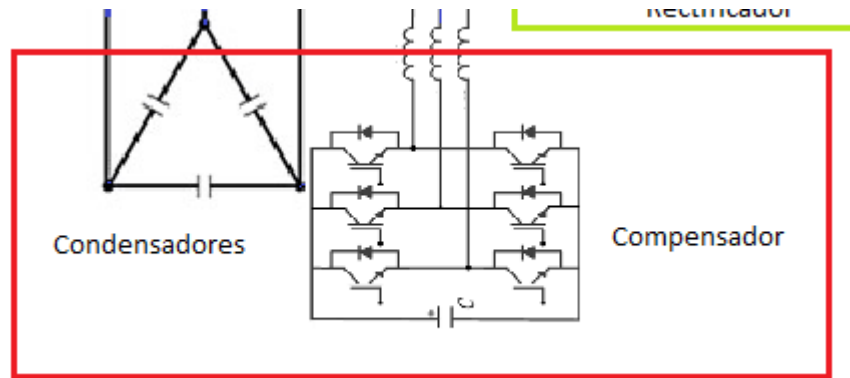


Figura 3.6. Elementos de la excitación, formada por los condensadores y la fuente de reactiva ajustable. Ambos elementos se complementan, pues los condensadores permiten el arranque en vacío cuando los IGBTs se encuentran bloqueados y una vez este la máquina excitada y girando en vacío el compensador entrega reactiva.

En cuanto al dimensionado de los elementos, los condensadores deben de entregar la misma reactiva que la máquina consume en el ensayo de vacío.

Obtuvimos una reactancia mutua de 23Ω .

Por tanto, los condensadores serán:

$$\frac{1}{100\pi 23} = 138 \mu F$$

Los condensadores requieren de la conexión de pequeñas resistencias en paralelo, atendiendo a la normativa de baja tensión y a la seguridad, para descargarlos, cuando estén desconectados.

El compensador debe de ser capaz de entregar la reactiva de forma graduable para mantener excitada la máquina a distintas capacidades.

Tiene pues que tener una tensión mayor que la tensión de cresta de la red. ($230 \cdot \sqrt{2}$).

Tratando al compensador como si fuera una máquina síncrona, se puede calcular la cantidad de reactiva que es capaz de entregar.

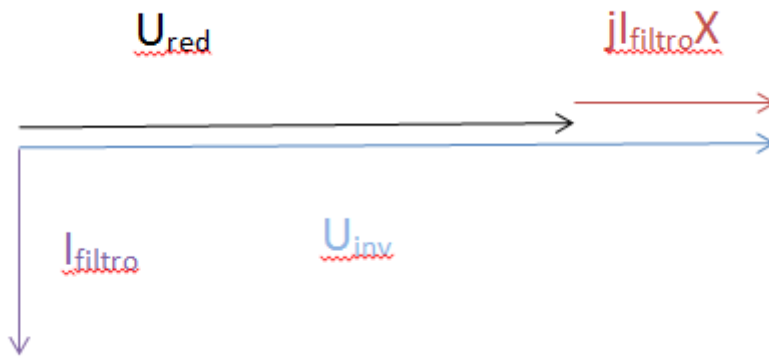


Figura 3.7. Se propone como consigna 400V para el condensador electrolítico y se proponen filtros de 0,01 H (inductancias).

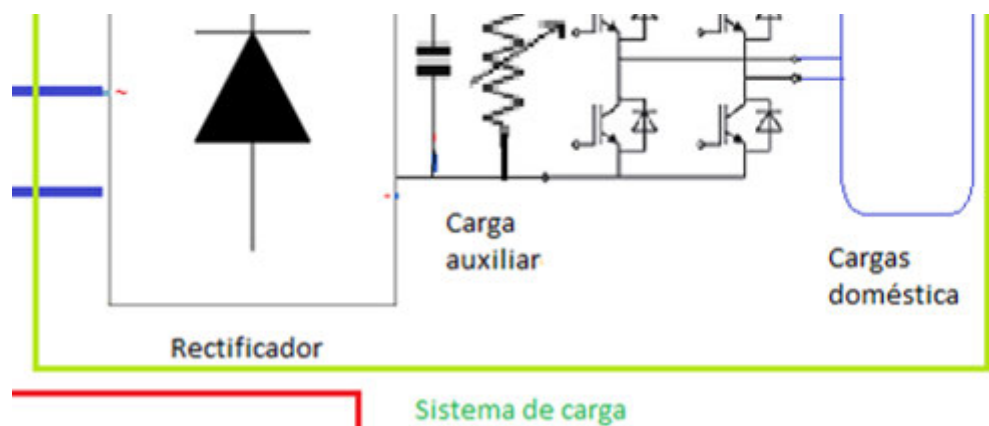
$$I_{inv} = \frac{U_{inv} - U_{red}}{X_{inv}} = \frac{\frac{400}{\sqrt{2}} - 230}{100\pi 0,02} = 8,41 \text{ A}$$

$$Q = \sqrt{3} 230 8,41 = 3,350 \text{ kvar}$$

Que para este sistema es potencia reactiva más que suficiente para las solicitudes que pueda haber. De la fórmula anterior se muestra la importancia de un condensador con mayor tensión que la de la red, pues lo contrario implica incapacidad para entregar reactiva.

En cuanto a la capacidad del condensador dieléctrico, tiene que ser del orden de los mF. En la simulación 1mF, mantenía la tensión constante en 400 V, con rizado de 1V, con lo que será suficiente.

3.3.4.Carga



3.3.4.1. Puente de diodos

$$U_{dc} = \frac{2}{\pi} \sqrt{3} \frac{U_{linea}}{\sqrt{3}} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) = 1.35 U_{linea} = 310.6V$$

3.3.4.2. Carga auxiliar

Si tenemos una potencia de 4.2KW como máximo, con una resistencia de 22.8Ω aproximadamente 20Ω, se puede conseguir disipar esa potencia.

Queda hablar de refrigeración. Para el lastre se utilizará convección natural, dejando a la carga sumergida en agua.

3.3.4.3. Inversor monofásico

Cuatro puentes de IGBTs, que con la tensión del bus de continua siendo su máxima de cresta, pueden obtener hasta 220 V. de tensión eficaz.

$$\frac{310,6V}{\sqrt{2}} = 219.62V$$

3.4. Sensores de medida

Dos sensores de efecto Hall miden la tensión de línea del generador.

Un sensor de efecto-Hall de tensión, que mide la tensión del compensador.

Cuatro sensores de efecto-hall miden la corriente que circula por las tres fases del generador, por el filtro y hacia las cargas.

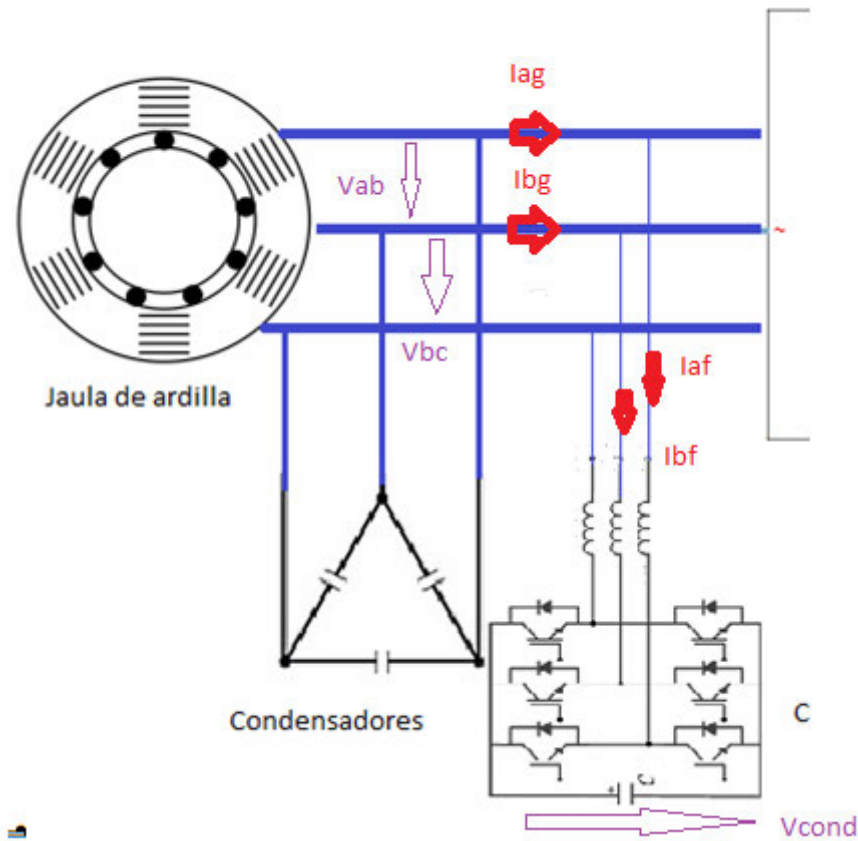


Figura 3.8. Posición de los sensores de efecto-Hall. Dos sensores de efecto-Hall (tensión) miden las tres tensiones de línea(aplicando KIrchoff), cuatro sensores de efecto-Hall (corriente) son capaces de medir 9 corrientes aplicando Kirchhoff. Por último se dispone de un último sensor de tensión(también efecto Hall), que mide el potencial del compensador.

Equilibrio de tensiones:

$$V_{ab}+V_{bc}+V_{ca}=0$$

Equilibrio de corrientes generador:

$$I_{ag}+I_{bg}+I_{cg}=0$$

Equilibrio de corrientes compensador/filtro:

$$I_{af}+I_{bf}+I_{cf}=0$$

Equilibrio corrientes nudo:

$$I_{ag}=I_{af}+I_{ac}$$

$$I_{bg}=I_{bf}+I_{bc}$$

$$I_{cg}=I_{cf}+I_{cc}$$

De aquí se deducen todas:

$$V_{ca} = -(V_{ab} + V_{bc})$$

$$I_{cg} = -(I_{ag} + I_{bg})$$

$$I_{cf} = -(I_{af} + I_{bf})$$

$$I_{ac} = I_{ag} - I_{af}$$

$$I_{bc} = I_{bg} - I_{bf}$$

$$I_{cc} = I_{af} + I_{bg} - I_{ag} - I_{bf}$$

También se dispondrá de un imán pegado al rotor, que gira solidario a este y que permite medir la velocidad de giro de este.

3.5. Protecciones

Para plantear las protecciones, antes hay que plantear que posibles fallos puede tener la máquina.

Pérdida de carga.

Este es el más importante. Que falle el control electrónico de carga y desaparezca el par eléctrico que contrarresta el par motriz, aumentando la velocidad de giro del rotor.

El servomotor recibe orden de cerrar el actuador situado a la entrada de la turbina. Pues existe un sensor que mide la velocidad de giro del rotor.

Sobretensión

Frente a sobretensiones, se debe desconectar el sistema de excitación, formado por los condensadores y el compensador.

A partir de los sensores de efecto-Hall medidores de tensión y el DSP se puede construir un relé. Se vigilan que en todo momento no se sobrepasen un cierto nivel de tensión. Si así fuera, se actuaría sobre el sistema de excitación. Con varistores, se desconectan los condensadores y los puentes del convertidor se bloquearían, en la posición (0,0,0) o en la posición (1,1,1). Desexcitando la máquina en décimas de segundo.

Fallas de Tierra

Para la protección en caso de derivación de corriente a tierra serán necesarios los interruptores diferenciales. Un DCR (Dispositivo de Corriente Residual) desconectará la fuente de electricidad cuando una falla de este tipo hace que corra una corriente eléctrica grande (p.e. en caso de que la caja se “toque” accidentalmente la tierra). El DCR también puede interrumpir la corriente de la fuente si alguien accidentalmente toca un alambre vivo causando un flujo de corriente a través de su cuerpo hacia la tierra. Eso reduce el riesgo de choques eléctricos fatales aunque éstos todavía pueden ocurrir si alguien toca una línea viva y neutro a la vez que estén aislados de la tierra. El DCR requerido es del tipo que tiene una corriente de actuación de 30mA.

Sobrecorrientes

Para evitar que una sobrecorriente destruya el generador se instalaran unos interruptores magnetotérmicos.

4.- Modelo de simulación de la planta

Esta ha sido la parte que más tiempo ha llevado del TFG. Pues para obtener resultados se ha requerido aprender a usar los bloques de simulink, de forma gradual y realizando pequeñas simulaciones uno a uno de todos los elementos utilizados, más luego su unión. Debido a la inexperiencia me ha costado un poco más.

4.1. Entorno de simulación

Se ha utilizado el entorno de programación visual de simulink, que opera sobre el entorno de programación Matlab. Para realizar el modelo, se utiliza la librería de Simpowersystems, pues dispone de todos los elementos requeridos modelados, así como su lógica de control, sacada de otras librerías propias de simulink.

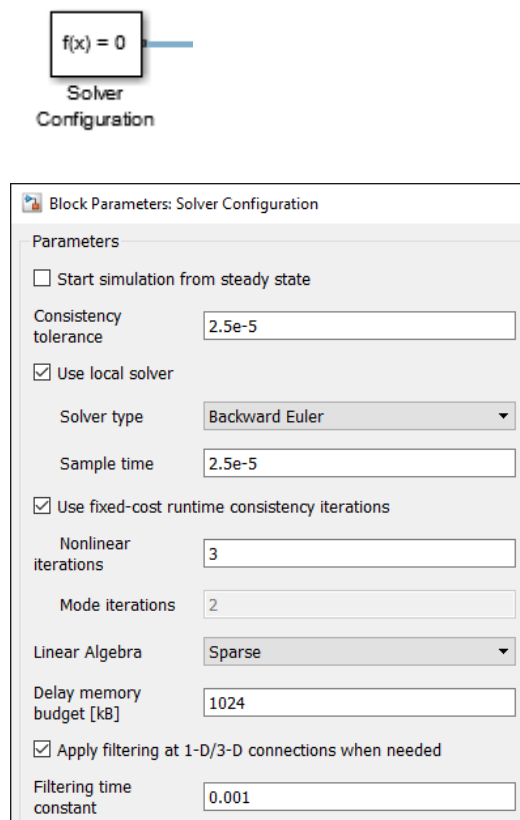


Figura 4.1. Configuración para la resolución del modelo. Se realiza por etapas, con un tiempo discreto de $2,5 \times 10^{-5}$

Importante destacar que todas estas simulaciones son aproximaciones a la realidad y se han resuelto empleando una simulación que divide el tiempo en etapas de $2,5 \cdot 10^{-5}$ s. Lo que significa que se divide cada segundo de la simulación en 40000 etapas y los valores de cada etapa serán una operación de las señales de la etapa anterior. Esto, aunque puedan parecer muchas operaciones si se compara con la duración de una onda eléctrica (20 ms o lo que es lo mismo, divides la onda en 800 etapas), comparada con la velocidad a la que conmuta un inversor, no es tanta, pues un inversor que conmute en KHz, pierde mucha precisión en los resultados. Pero hay que buscar un compromiso entre duración de las simulaciones y fidelidad con la realidad y exceptuando los inversores modulados en fuente de tensión, el resto de elementos

aparece simulado fielmente con esta configuración (máquina, condensadores, filtro y control por histéresis)

4.2. Programación del modelo

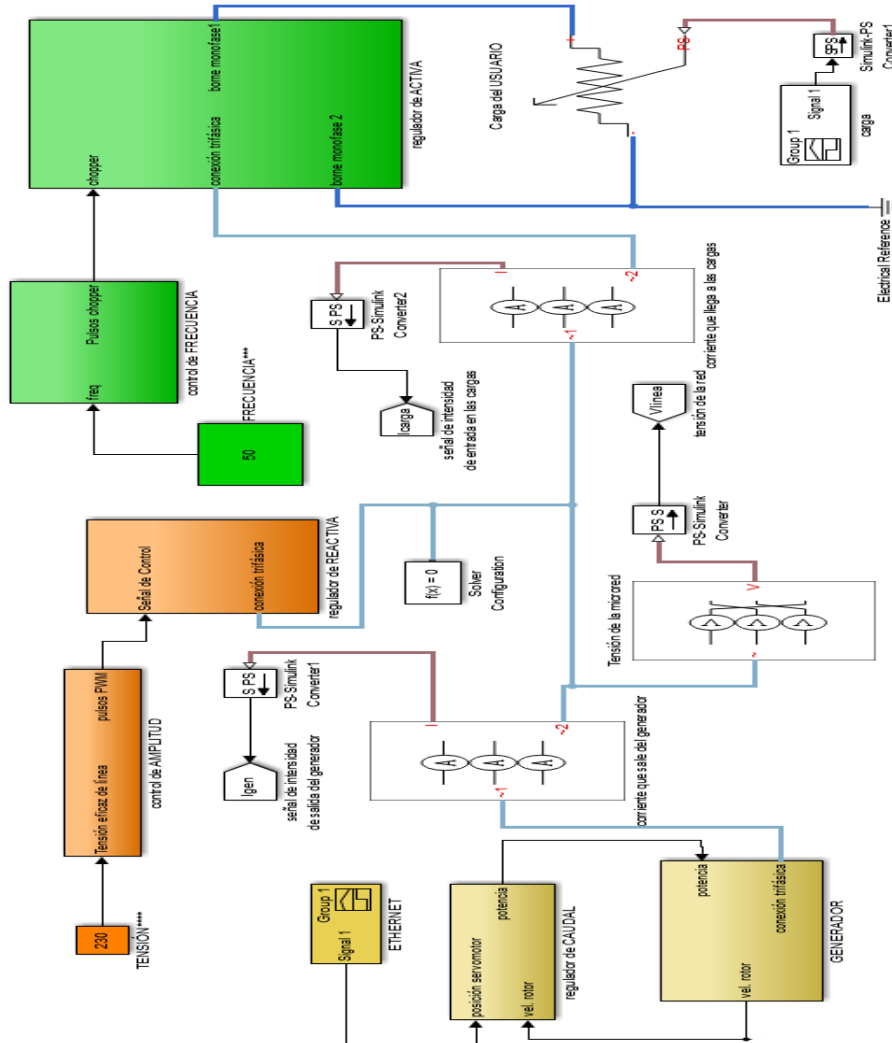


Figura 4.2. Modelo en simulink del sistema eléctrico.

En amarillo se representan los componentes mecánicos del sistema.

En naranja se representan los elementos relacionados con la excitación.

En verde se representan los elementos relacionados con la carga.

4.2.1. Bloque turbina/regulador

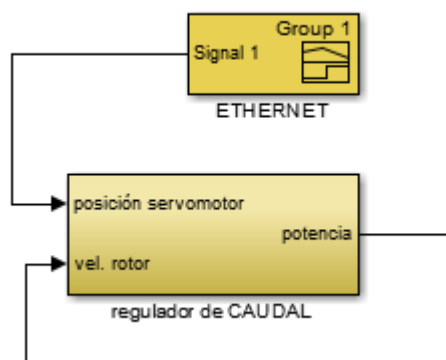


Figura 4.3. Representación muy simplificada del sistema que regula la potencia entrante al generador.

Esta señal tiene una pendiente, que está limitada por la velocidad de apertura o cierre del servomotor. La máxima potencia que puede entregar es 4,78 KW, que se consigue cuando está completamente abierta. Como tarda 30 seg. desde vacío hasta esa cifra, la máxima pendiente es de (+-)160 KW/s. La rampa, podrá variar su pendiente libremente dentro de esos márgenes y será plana, cuando el servomotor esté quieto.

Por último, el control se bloqueará y automáticamente cerrará el actuador tan rápido como pueda si el sensor situado sobre el rotor, detecta una velocidad superior a 1,2 veces la velocidad de giro en vacío (se explica en el apartado de protecciones).

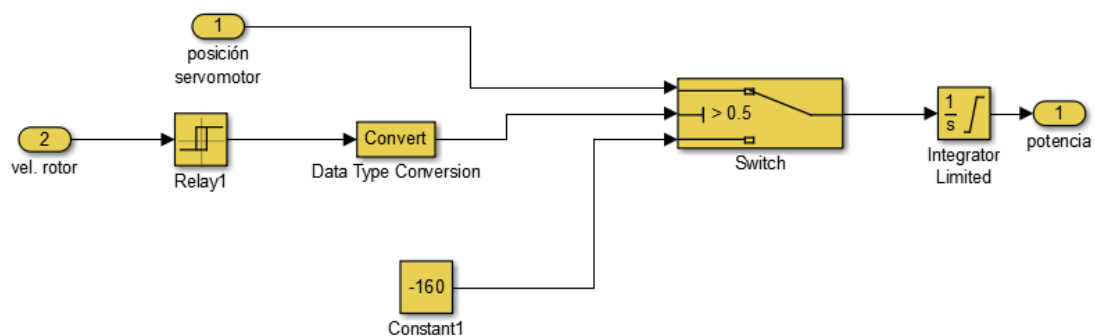


Figura 4.3. Modelo del regulador de caudal. Se genera una señal escalonada, que es posteriormente integrada para generar la señal en rampa que suministra potencia al generador. Aparece representada la protección que bloquea la señal del usuario, ante embalamiento.

El servomotor permite abrir más o menos la compuerta del regulador, en función de una señal regulable a distancia. Si la velocidad del rotor es mayor a 1.2, el servomotor recibe orden inmediata de cerrarse, para evitar daños en el sistema.

4.2.2. Bloque sistema eléctrico

4.2.2.1. Bloque generador

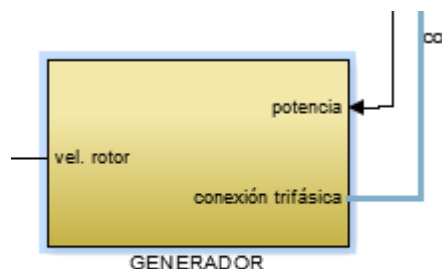


Figura 4.4. Grupo generador

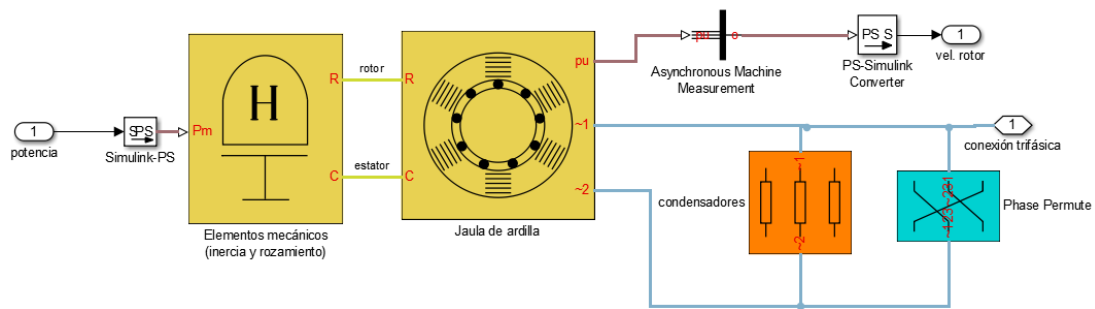


Figura 4.5. Aquí se dispone del grupo generador y su accionamiento mecánico. se ha aprovechado además la conexión en triángulo para conectar los condensadores.

Dentro de la librería Simpower, hay otras dos:

- Specialized technology
- Simscape components

En estas simulaciones se ha cogido este segundo conjunto de bloques pues permitía cambiar la configuración estrella-triángulo.

Se han introducido los valores del circuito equivalente en pu en la máquina de su dimensionamiento. Importante añadir que no se ha introducido curva de histéresis de la máquina ni tampoco resistencia del hierro.

Los condensadores de autoexcitación introducidos son aquellos calculados a partir de los datos de vacío.

El bloque “azul” permite la conmutación de las fases requerida para la conexión en triángulo tanto de condensadores como del propio generador

4.2.2.2 Bloque de excitación

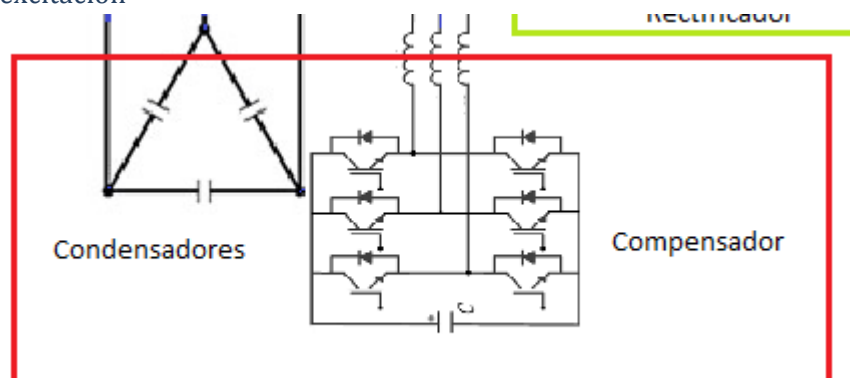


Figura 4.6. Grupo excitación. Como se dijo se dispone de dos elementos. Los condensadores y la fuente de reactiva ajustable explicada en 3.3.3. Los condensadores aparecen representados en el grupo generador(figura 4.5.), el compensador se modela a continuación.

4.2.2.2.1.Lógica de control

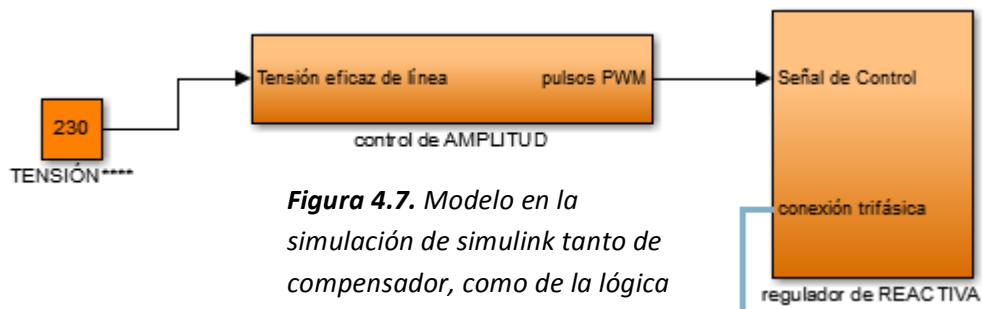


Figura 4.7. Modelo en la simulación de simulink tanto de compensador, como de la lógica que lo regula.

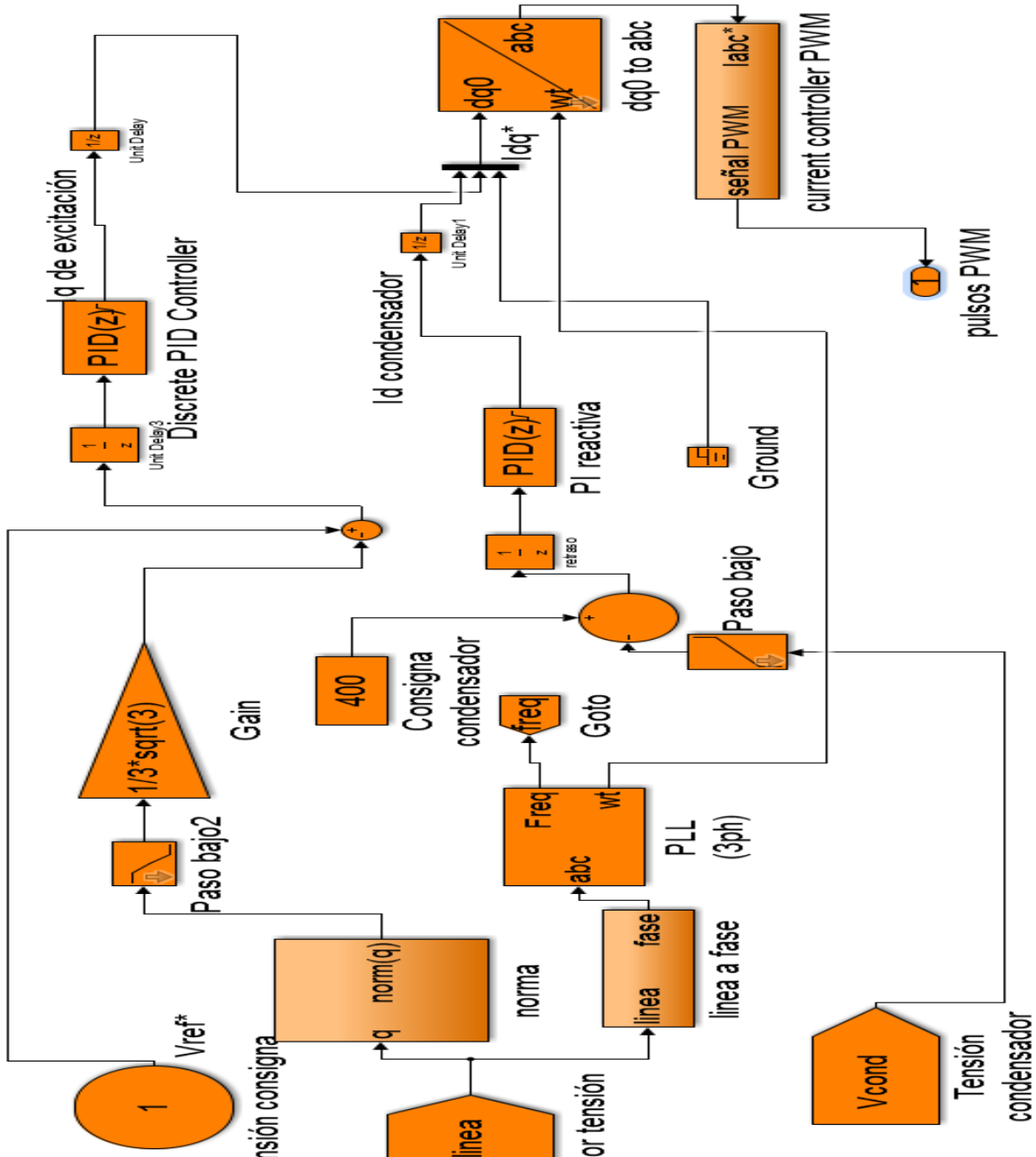


Figura 4.7. Esta sería su lógica de control: Que son dos reguladores PI, uno encargado de mantener la tensión del condensador y otro encargado de mantener la tensión de la red. Se toma como sentido positivo de las intensidades, aquellas que entran al convertidor.

Tomo como referencia las tensiones de fase, que obtengo a partir de las tensiones de línea medidas por los voltímetros.

Se cumple que:

$$V_a = \frac{V_{ab} - V_{ca}}{3}$$

$$V_b = \frac{V_{bc} - V_{ab}}{3}$$

$$V_c = \frac{V_{ca} - V_{bc}}{3}$$

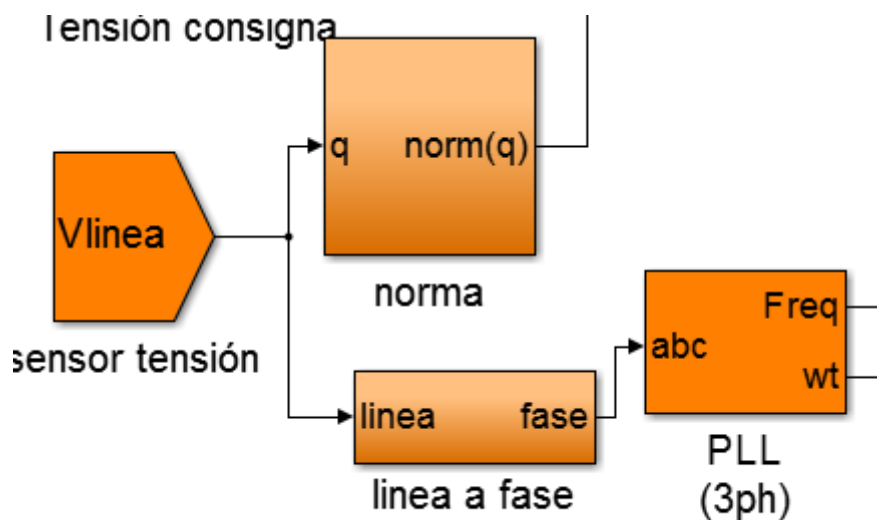


Figura 4.8. Obtención del ángulo y el módulo del vector tensión, que uso como referencia para las componentes de la intensidad. Obtenidos de la **figura 4.7**.

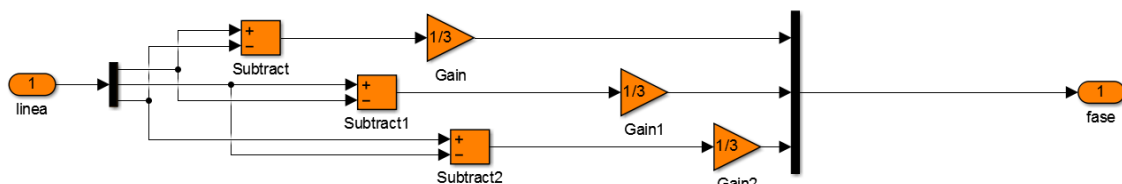


Figura 4.9. Subsistema línea-línea a fase-neutro de 4 visto por dentro.

De aquí se obtiene la referencia para el PLL. Se tendrá una intensidad paralela a la tensión que ajustada con un PI se encarga de regular la carga y descarga del condensador.

Habrà una componente de la intensidad perpendicular a la tensión, con la que se ajusta la tensión de la red. Esto lo consigue por medio de la inyección de reactiva. Debe recordarse que para esto la tensión del condensador del compensador tiene que ser mayor que la tensión de pico de la red.

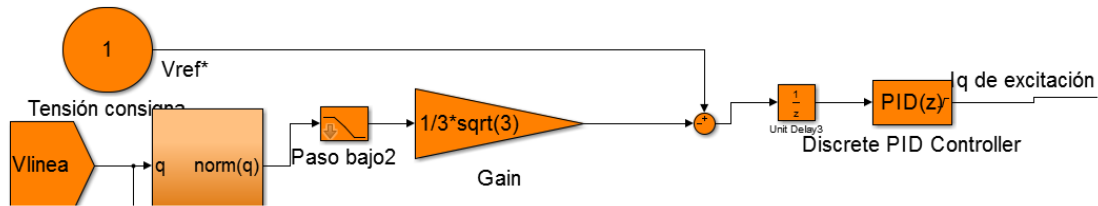


Figura 4.10. Lógica que regula la excitación: Mide las tensiones de línea, calcula la media cuadrática y multiplica por una constante para compararla con la tensión. Se añade además un filtro de paso bajo para tener mejor medición de esta.

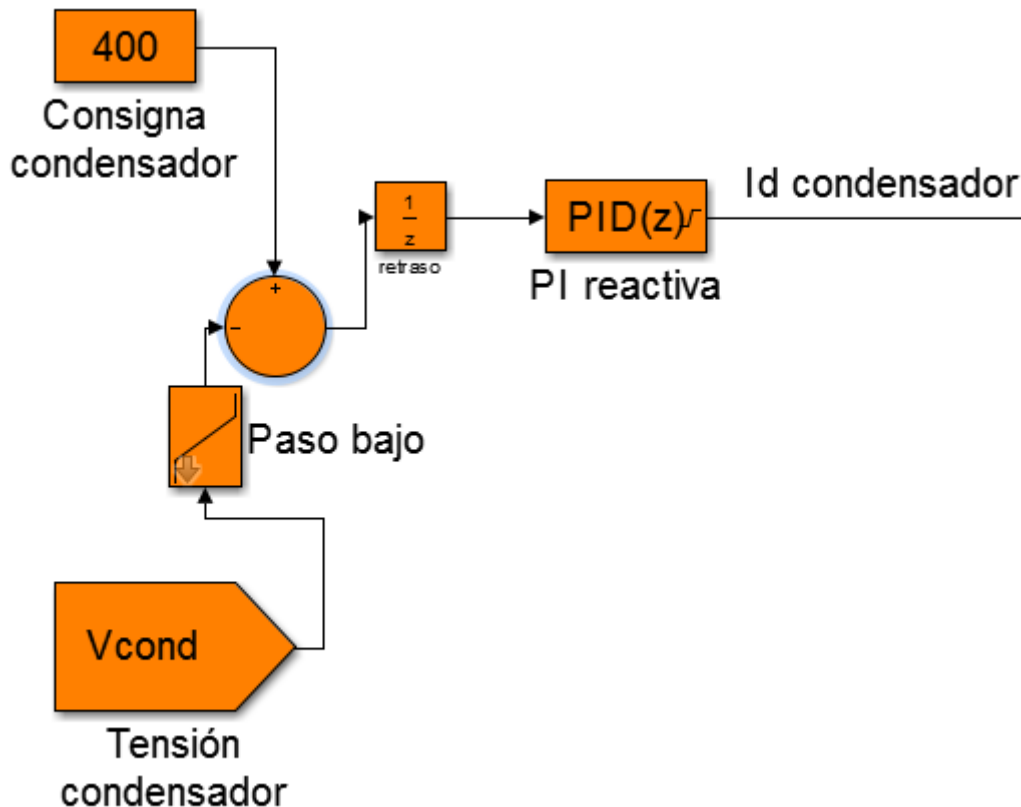


Figura 4.11. Lógica que regula la tensión del condensador: Esta I_d consigue variar la tensión del condensador, haciendo que sea mayor que la tensión de pico de la red, para que así se pueda entregar reactiva.

El filtro de paso bajo añadido, permite eliminar las pequeñas fluctuaciones en la tensión que pueda haber en este.

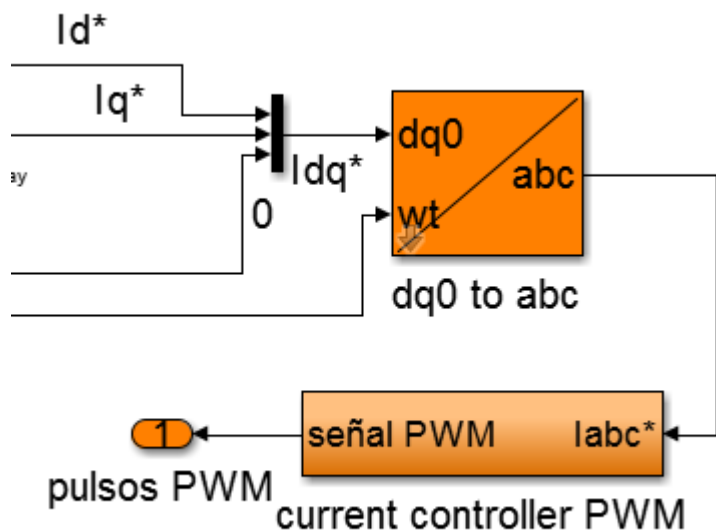


Figura 4.12. Se realizan las antitransformadas. A partir de las componentes en cuadratura y así se obtienen las corrientes de referencia. El control por bandas de histéresis obtiene de forma muy rápida y precisa pulsos del convertidor electrónico de IGBTs, que consigue esas corrientes.

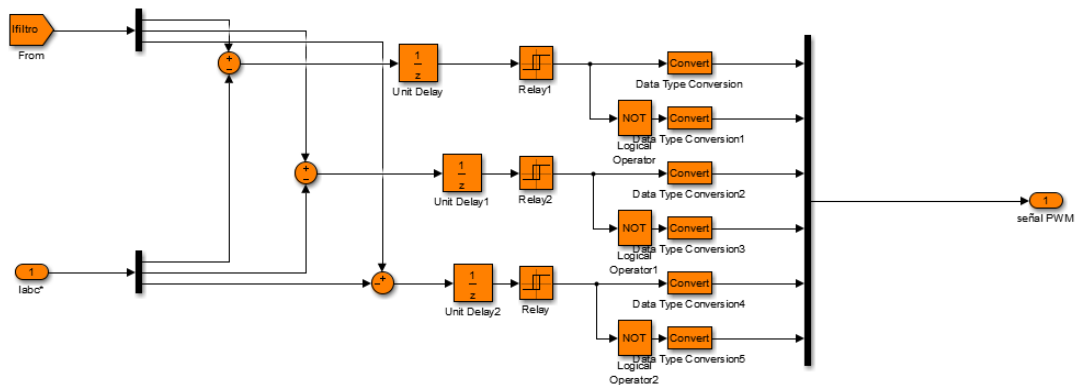


Figura 4.13. Control por bandas de histéresis: Se realiza por medio de bandas que permutan los disparos de los IGBTs. Cada vez que las corrientes que entran al filtro sobrepasan esa banda, su par de IGBTs correspondiente conmuta, por lo que se consigue un control muy fino de la intensidad y muy rápido comparado con los controles de tensión. A cambio se pierde control sobre el número de conmutaciones de los IGBTs.

A la hora de dimensionar un control por histéresis, hay que establecer una frecuencia de conmutación que sea posible. Ni muchas conmutaciones, pues se podría perder mucha eficiencia, pero tampoco pocas que se pueda perder la forma de onda.

Se establece un límite de 10 KHz, este se dará cuando la tensión que se quiera obtener sea cercana a 0. Con los transistores se conmuta de 400 V a -400 V (tensión que establezco en el condensador), pues habrá que ver qué banda en el cálculo de la intensidad permite esos valores.

$$\text{Posición 1: } V_1 = \frac{L_{\text{filtro}} \Delta I_1}{t_1}$$

$$\text{Posición 2: } V_2 = \frac{L_{\text{filtro}} \Delta I_2}{t_2}$$

$$\text{Posición 1: } 400 = \frac{0.02 \cdot 1}{t_1}$$

$$\text{Posición 2: } -400 = \frac{0.02 \cdot (-1)}{t_2}$$

$$t_1 = t_2 = 0.00005$$

Un ciclo es $t_1 + t_2 = 0.0001$

Obteniendo los 10KHz en el caso más desfavorable

4.2.2.2.2. Hardware

En cuanto al modelado de la parte del Hardware, tenemos lo siguiente:

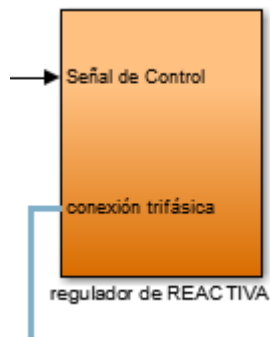


Figura 4.14. Subsistema con el Hardware.

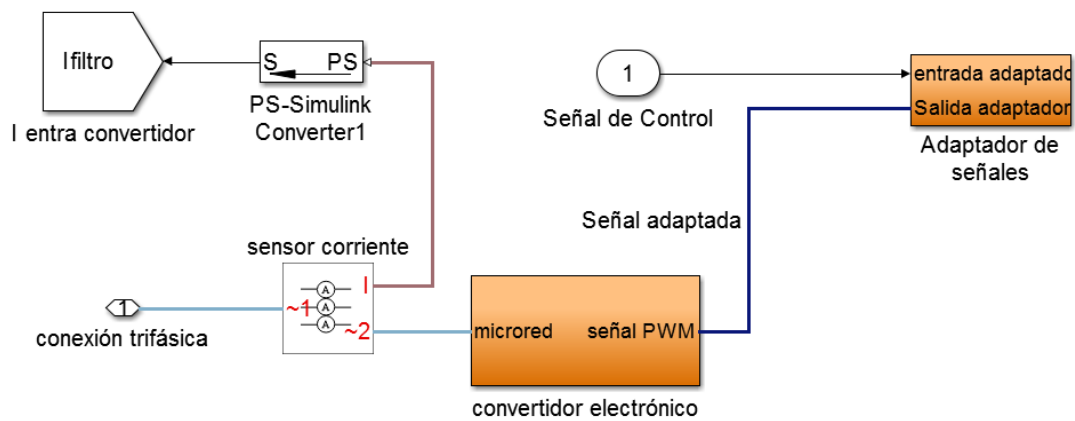


Figura 4.15. Elementos del subsistema 4.14.

Se tienen que transformar las señales del microprocesador en señales capaces de activar los transistores. Esto se consigue con drivers:

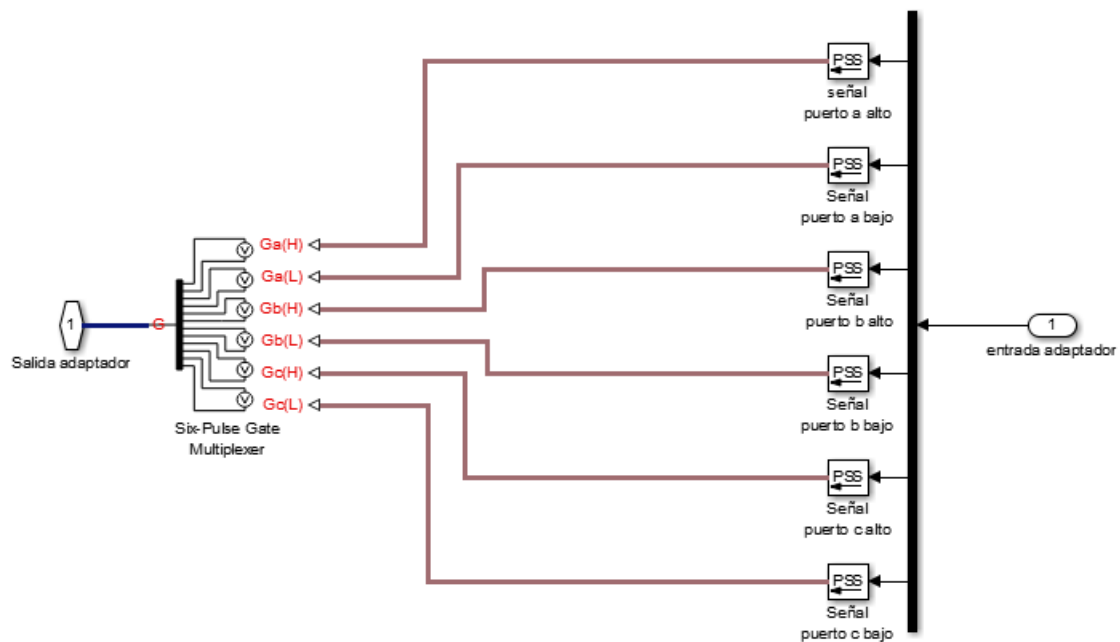


Figura 4.16. Modelado del adaptador de señales (DRIVERS), que adaptan las señales de control, a los voltajes que consiguen que los transistores conmuten.

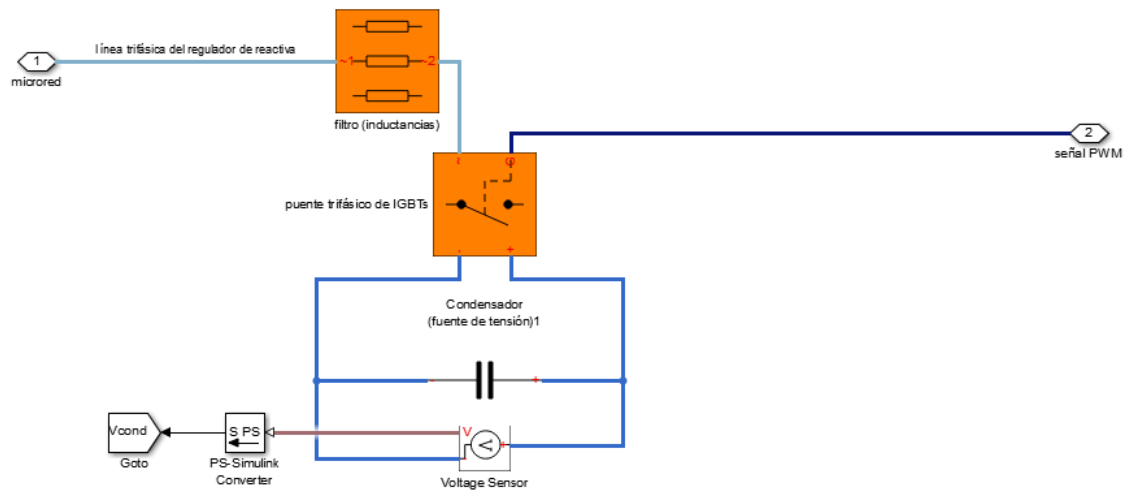


Figura 4.17. Por último, el bloque del convertidor electrónico, su condensador y las inductancias que actúan como filtro. Con los valores calculados en los apartados anteriores.

4.2.2.3. Bloque de carga

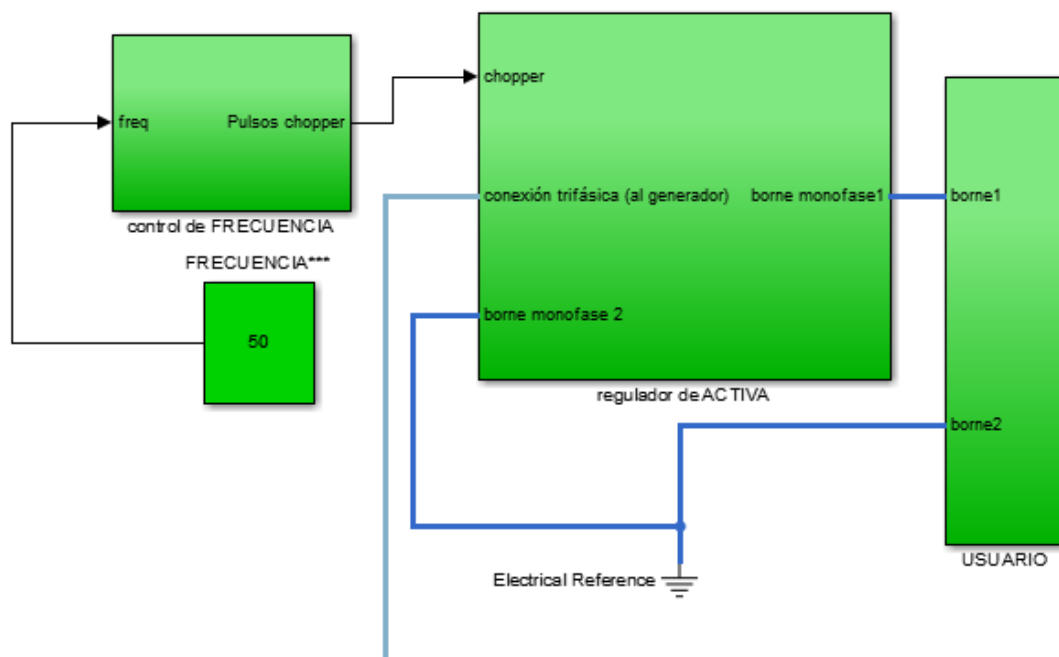


Figura 4.18. Elementos del modelo de simulink, relacionados con la carga.

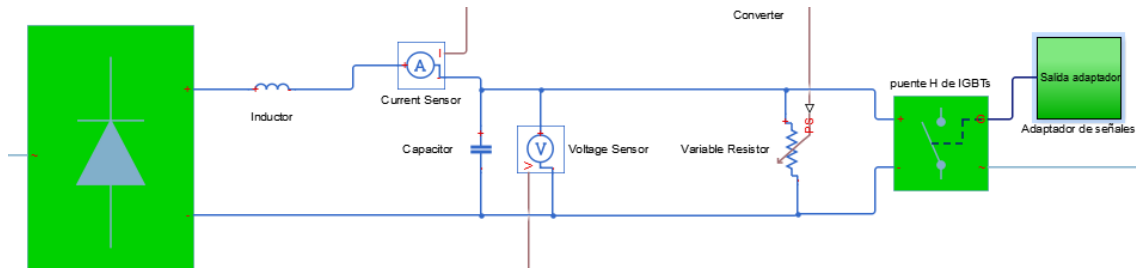


Figura 4.19. Puente rectificador, resistencia auxiliar y puente H para obtener monofase que representan todos los elementos de la carga.

Carga auxiliar

Rectificando la onda eléctrica se puede recortar posteriormente con un chopper. La señal de entrada al chopper es muy fácil de realizar y se obtiene a partir de una onda portadora (diente de sierra) y una moduladora (porcentaje de carga requerido) que mediante un comparador obtienen un tren de pulsos con lo que se consigue esa regulación fina de la carga de nuestra red.

Se planteó en un principio un transistor (MOSFET o IGBT) que nos permita regular la carga que observa nuestra red. Con una lógica de control basada en un comparador y un diente de sierra, que establece los pulsos del transistor del chopper.

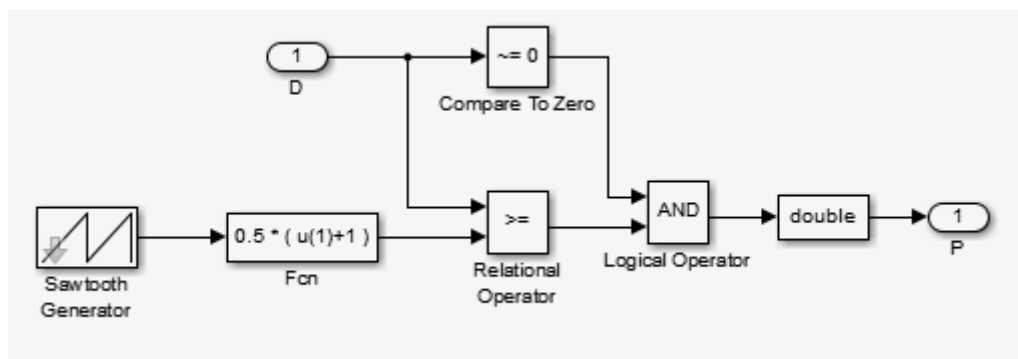


Figura 4.20. Onda portadora (señal diente de sierra) y onda moduladora (señal que indica porcentaje de la carga) son comparadas y generan la señal que controla el transistor (en simulink)

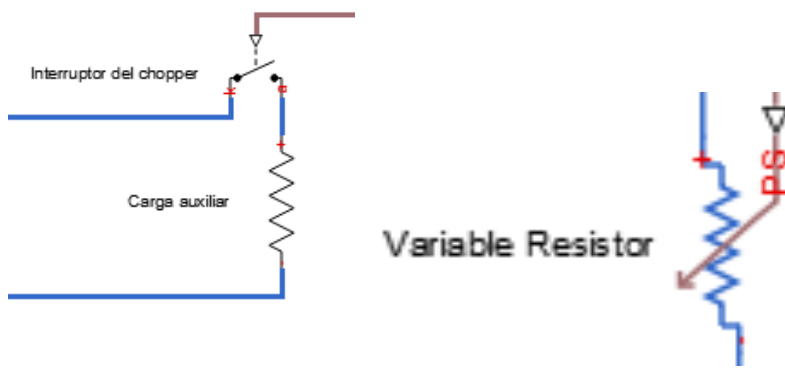


Figura 4.21. Transistor con un pulso chopper y reóstato. La configuración del método de resolución del modelo de simulink, tiene dificultades para simular este primer elemento, por lo que se ha simulado un reóstato, para así poder regular la potencia eléctrica.

Aunque esta estrategia es la que sería deseable implementar, debido a la alta frecuencia de conmutación de la señal diente de sierra (10 KHz) y como las simulaciones se realizan con etapas de frecuencia 40 KHz, la onda obtenida no es del todo precisa, por lo que regulo en la simulación como si fuera un reóstato variando su admitancia **Figura 4.21**.

En cuanto a la estrategia de regulación, tenemos tres potencias: la potencia total, la potencia consumida y la potencia auxiliar. Como no puede variar bruscamente la primera, es la que estimamos con un PI lento a partir de la frecuencia de la red. La potencia consumida puede variar bruscamente en función de las necesidades del usuario. Por último la potencia auxiliar actuará como balance para mantener este equilibrio de potencias, y se regula con variaciones rápidas del reóstato.

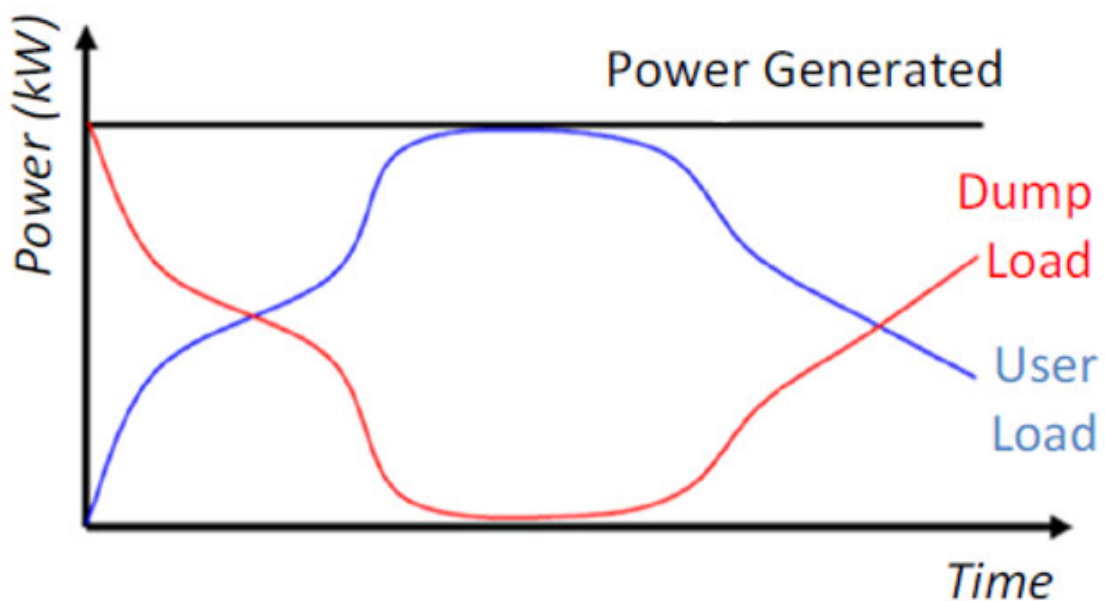


Figura 4.22. Potencia generada, potencia del usuario y potencia del lastre auxiliar.

Control

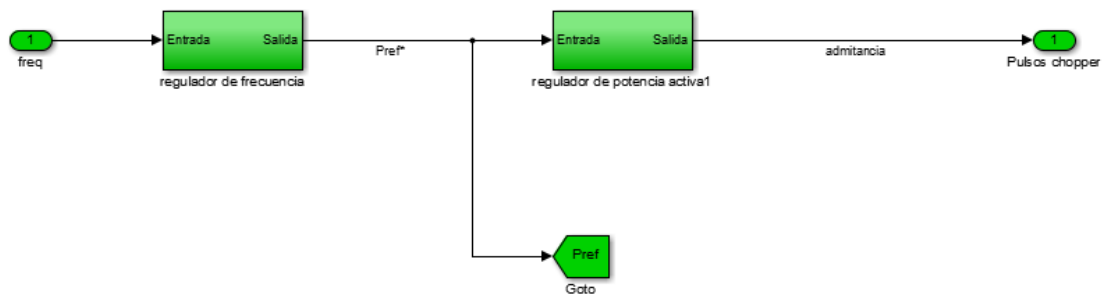


Figura 4.23. Estrategia de control de la potencia auxiliar: Se compara la potencia generada estimada necesaria con la potencia generada medida para así obtener un PI, que regule con mucha velocidad a nuestra carga auxiliar.



Figura 4.24. PI con respuesta lenta, que estima la potencia de referencia del segundo PI.

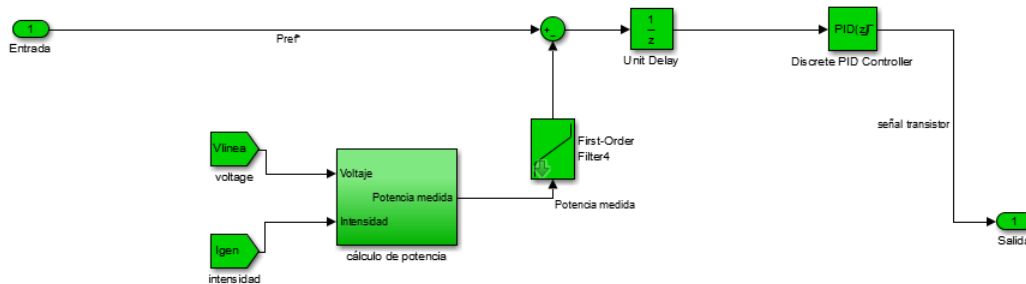


Figura 4.25. PI con respuesta rápida, con la que se regula la carga auxiliar. Se compara la potencia medida con la potencia de referencia obtenida en la salida de la figura 4.24.

Inversor

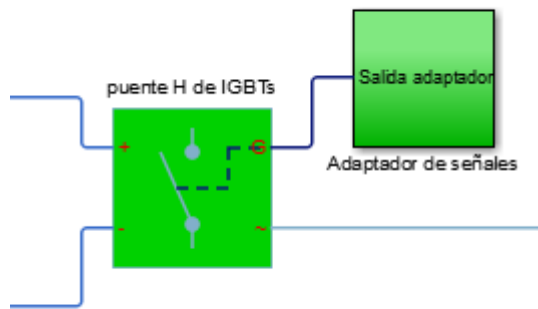


Figura 4.26. Hardware del convertidor

Hardware

Se utiliza un bloque que simula un inversor trifásico de IGBTs (el bloque que venía con simulink), con sus señales del adaptador, teniendo una de las parejas bloqueadas.

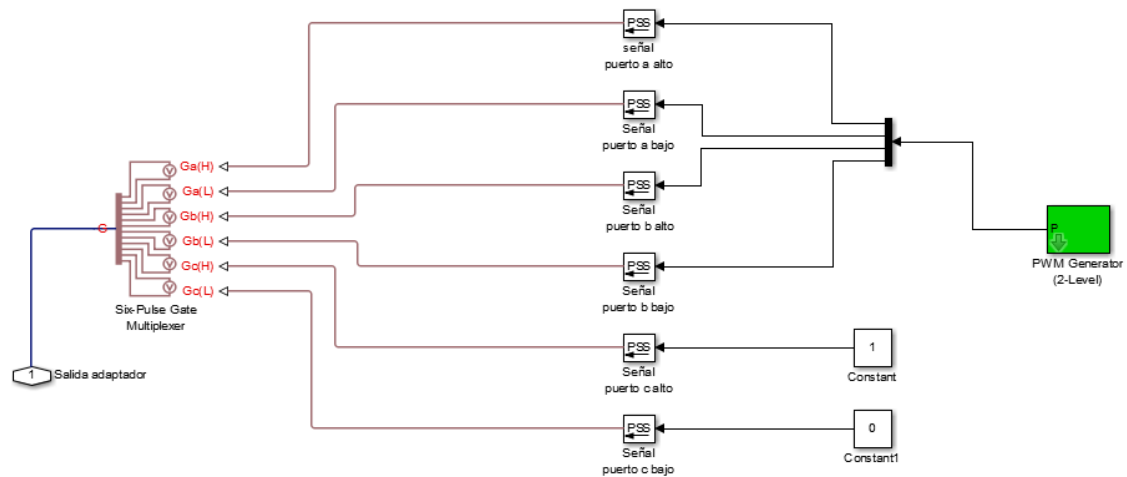


Figura 4.27. Adaptador de señales y su lógica de control.

Lógica de control

Generator type: Single-phase full-bridge - Bipolar modulation (4 pulses)		
Carrier		
Mode of operation: Unsynchronized		
Frequency (Hz):	Initial phase (degrees):	
100*50	90	
Minimum and maximum values: [Min Max]		
[-1 1]		
Reference signal		
Sampling technique: Natural		
<input checked="" type="checkbox"/> Internal generation of reference signal		
Modulation index:	Frequency (Hz):	Phase (degrees):
1	50	0
Sample time (s):		
0		
<input type="checkbox"/> Show measurement port		

Figura 4.28. Lógica que regula el inversor, onda moduladora de 5KHz, una onda portadora sinusoidal de amplitud 1, permite establecer las señales del inversor.

5. Ensayos y resultados

5.1. Simulación general

A continuación se representa el modelo ante una simulación, con la que se pretende mostrar el funcionamiento de nuestro generador. La simulación de 100 seg. de duración, dispone de los siguientes sucesos:

- Se deja girar en el instante inicial a la máquina con poca carga hasta que se estabilicen sus parámetros.
- Se abre el actuador de la turbina en el segundo 10, hasta el 35, provocando una entrada en rampa.
- En el segundo 50, el usuario conecta una carga de 20Ω , resistiva pura a los terminales del inversor monofásico.
- En el segundo 55, esa resistencia se desconecta.
- En el segundo 60, se empieza a cerrar el actuador, provocando una disminución en rampa de la entrada de potencia..
- En el segundo 85 deja de cerrarse, manteniéndose constante la potencia hasta el final de la simulación.

5.2 Entradas

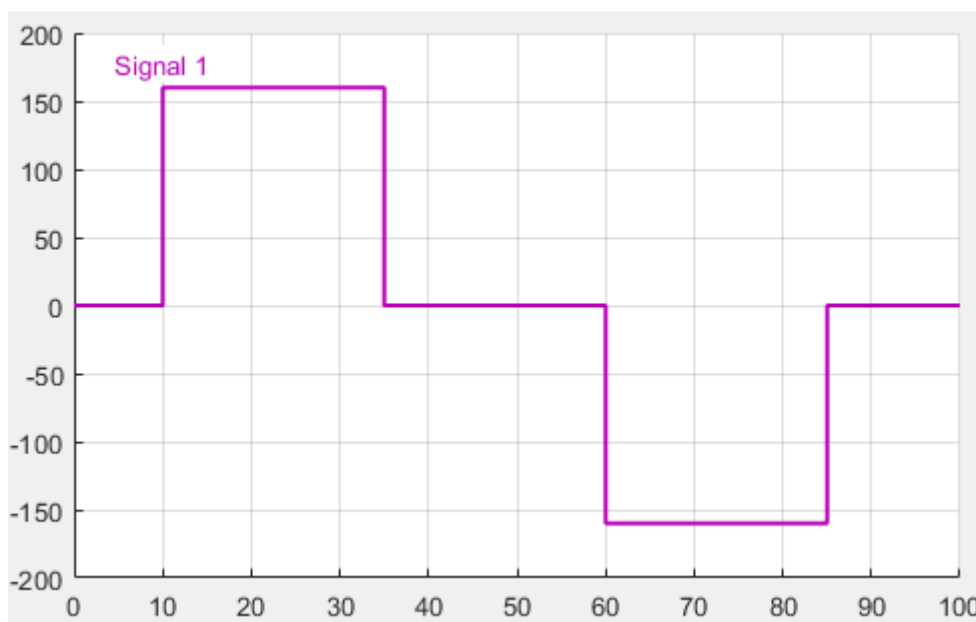


Figura 5.1. Velocidad del servomotor. Representa la velocidad del servomotor. Se ha considerado que esta variación es instantánea (despreciando sus inercias), para así obtener rampas en la entrada al generador.

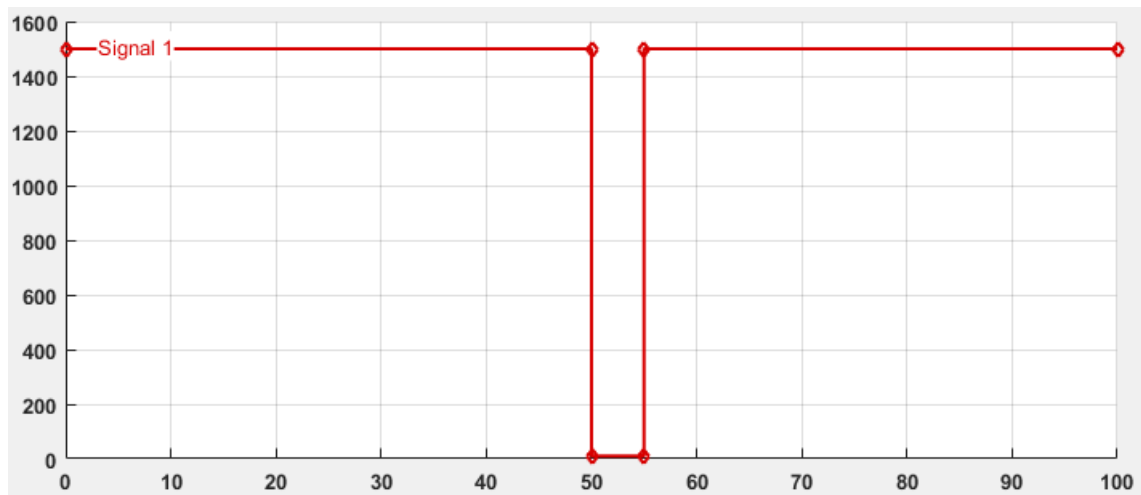


Figura 5.2. Resistencia de la carga auxiliar. Se mantiene en todo momento con un valor alto, para que la potencia consumida sea alta. Excepto en la etapa tercera, que está conectada la carga. Valor de 30 Ω .

Se obtienen estos resultados:

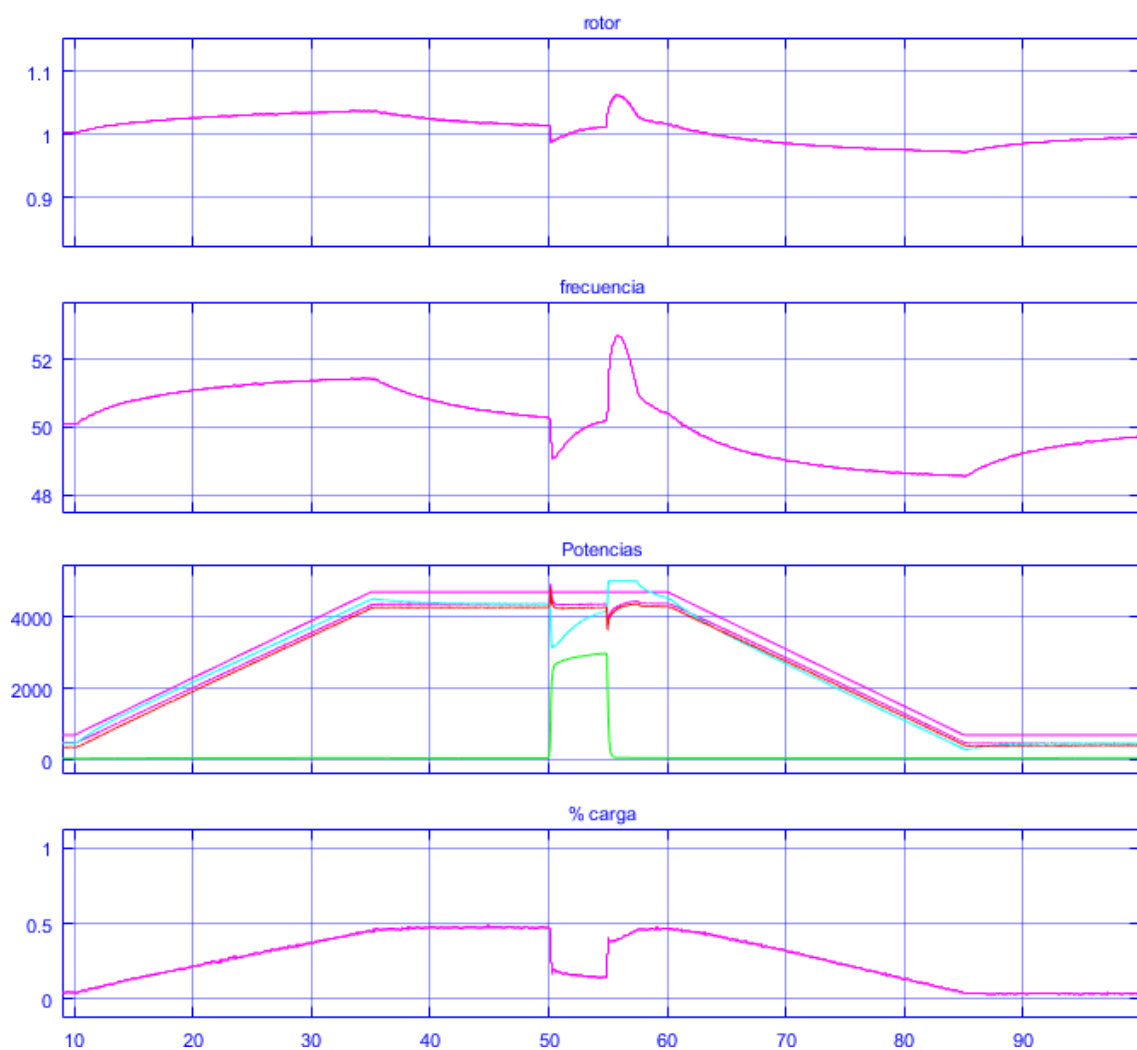


Figura 5.3. Cuatro gráficas, en donde aparecen:

1-Velocidad del rotor en pu

2-Frecuencia de la red medida por el PLL

3-Relación de potencias que son:

-En rosa aparece la potencia entrante en el rotor debida al caudal de agua.

-En azul aparece la potencia de referencia.

-En rojo aparece la potencia medida tras un filtrado, que elimine posibles armónicos.

-En verde, aparece la potencia de la carga del usuario, filtrada.

4-Porcentaje de carga

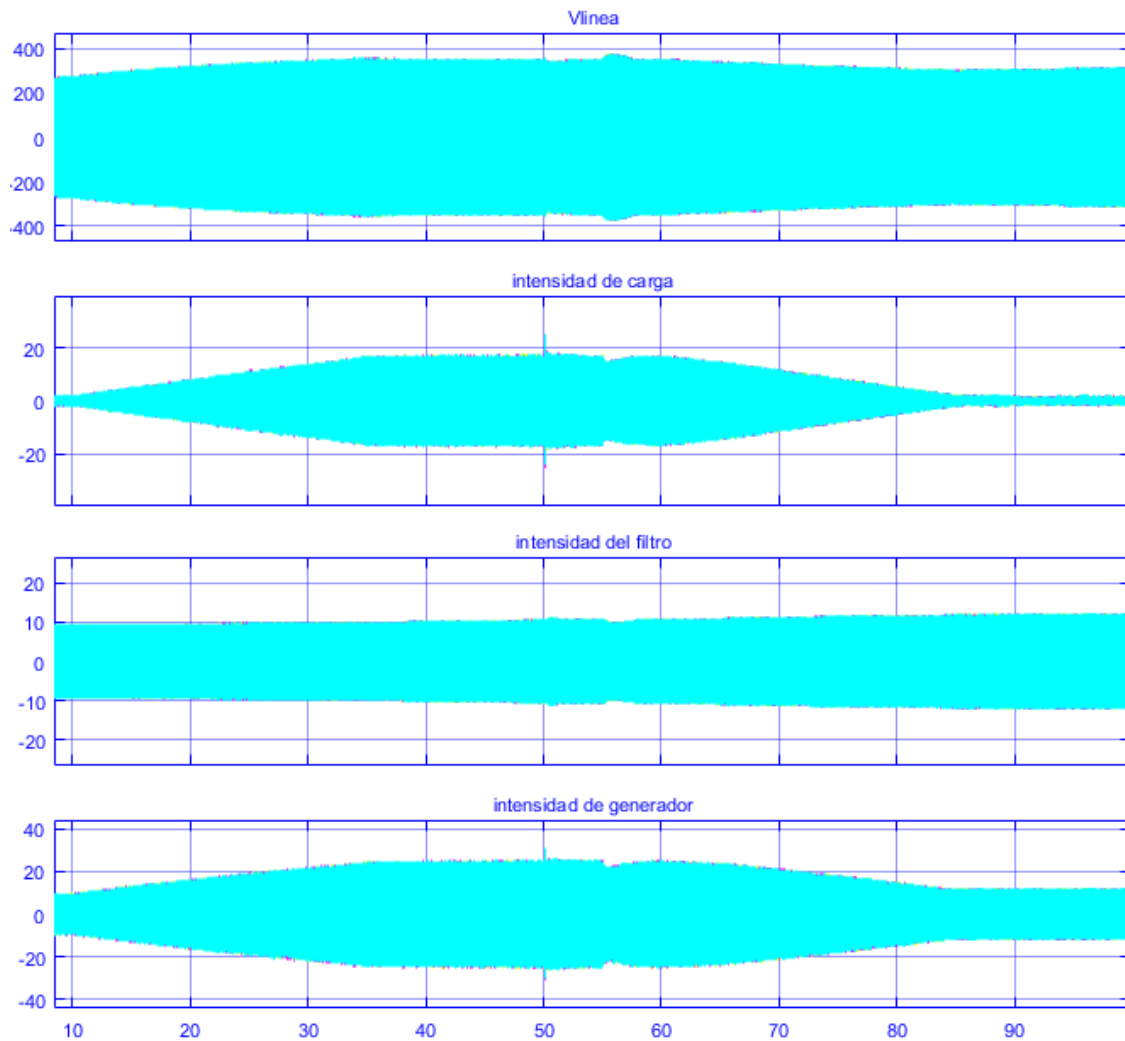


Figura 5.4. Cuatro gráficas que son:

-El voltaje de línea

-La intensidad de la carga

-La intensidad del filtro

-La intensidad del generador

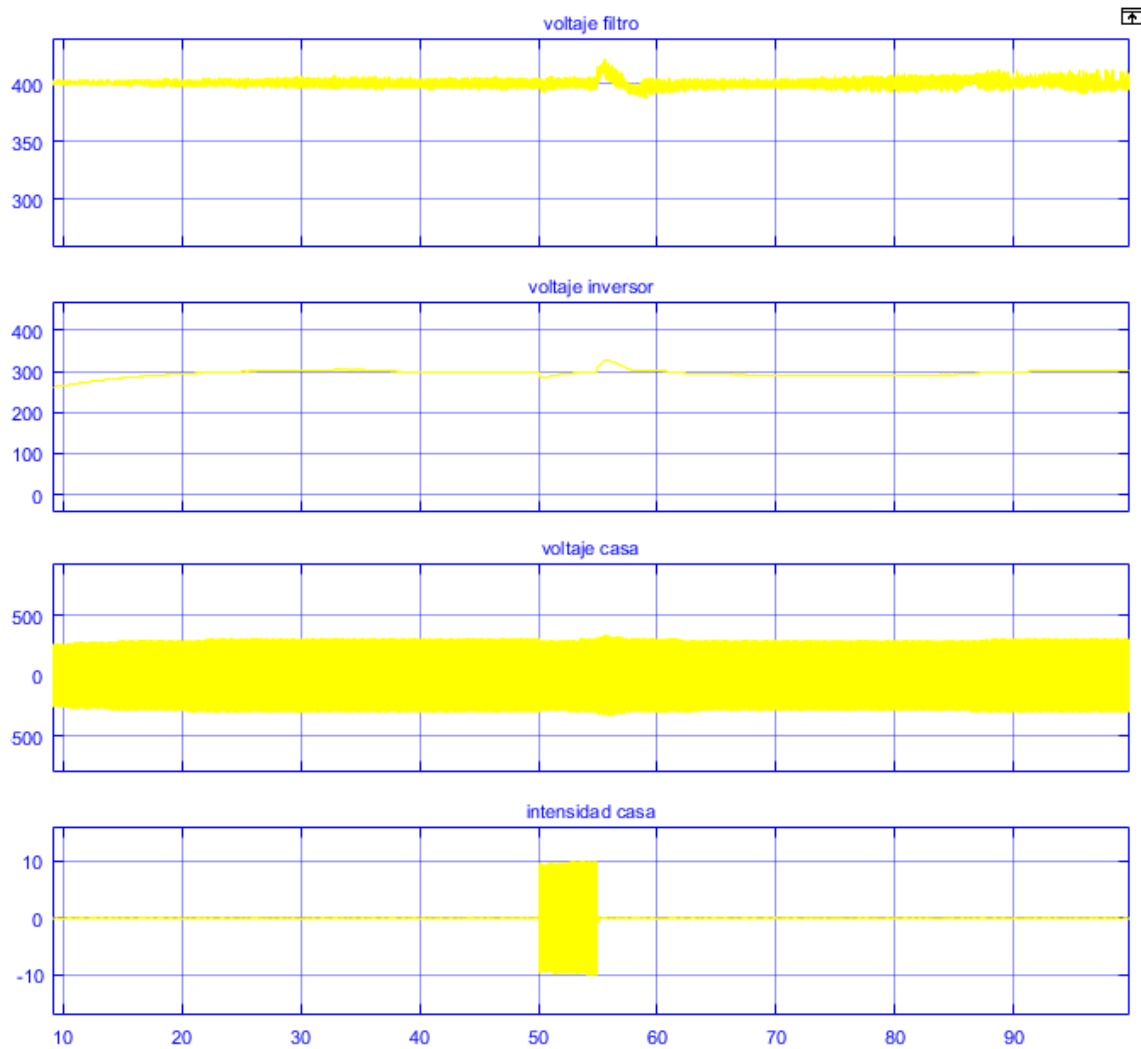


Figura 5.5. Cuatro gráficas que son:

1-Tensión del compensador

2-Tensión del inversor

3-Tensión de la casa

4-Intensidad de la casa

5.3. Aumento de la entrega de potencia

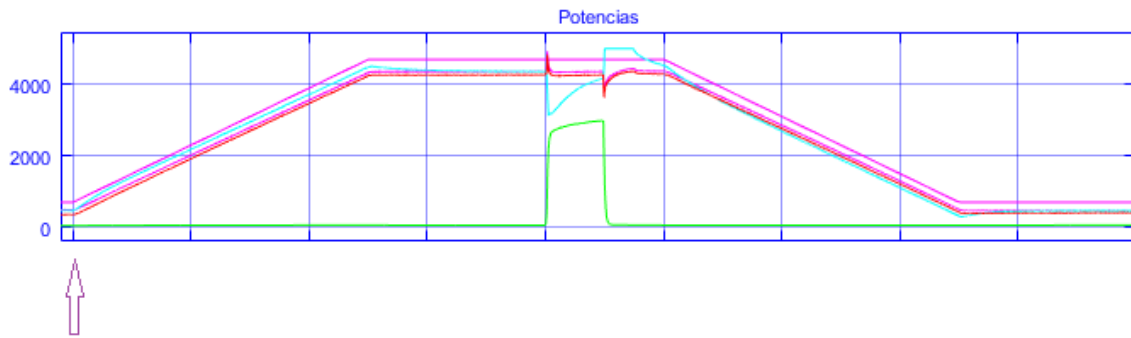


Figura 5.6. Incremento de potencia a partir de este instante.

En esta simulación se representará desde unas condiciones de funcionamiento consumiendo poca potencia (se entrega 700 W desde el inicio), como tras dársele 10 seg. al equipo para que se estabilice se abre el actuador del regulador de caudal tan rápido como sea posible y se inicia un aumento de la potencia entrante. La carga auxiliar se hace responsable de esta potencia generada extra y va gradualmente incrementando la potencia disipada en la resistencia.

De este primer evento, es destacable la frecuencia, que varía asintóticamente. Pues aparece un error de seguimiento de velocidad. Hay un error de seguimiento, que puede disminuirse aumentando el efecto integrador, aunque puede comprometer la estabilidad de los resultados. En la simulación, se estabiliza en 51.4 Hz.

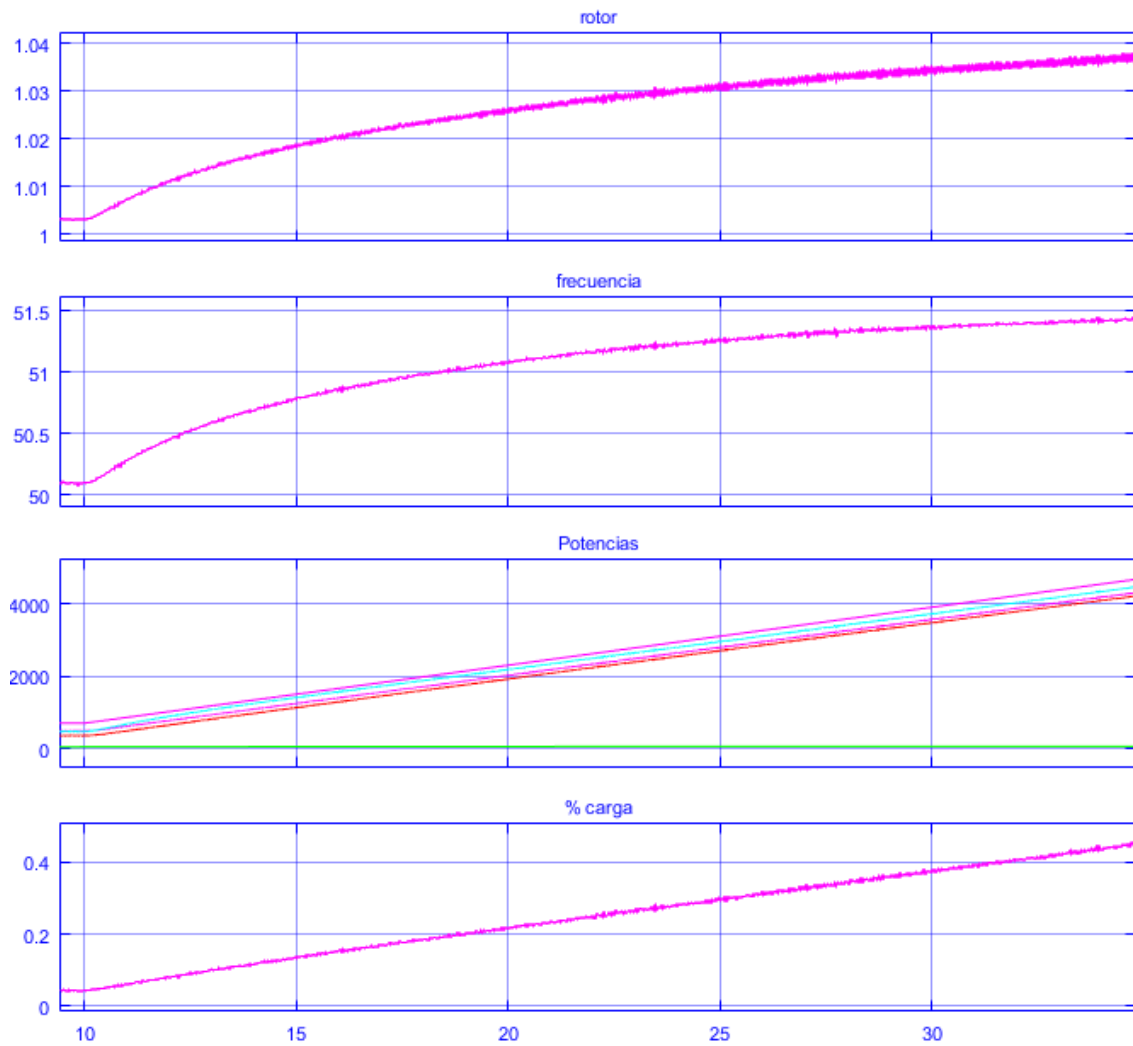


Figura 5.7. incremento de la frecuencia de forma asintótica debido a la entrada en rampa

A continuación, se amplía la forma de las ondas obteniendo lo siguiente:

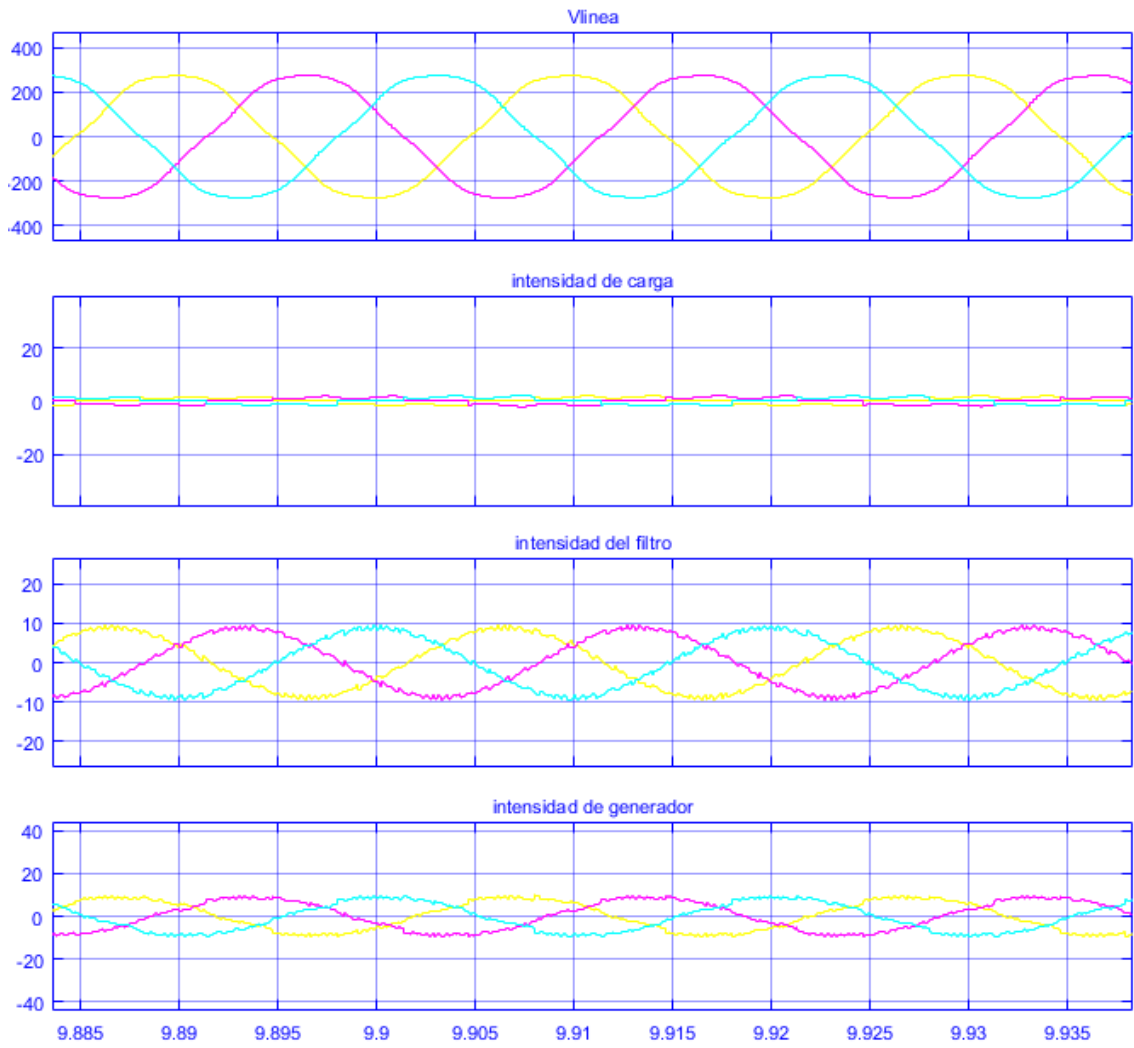


Figura 5.8. Máquina girando en vacío antes de la entrada en rampa.

La intensidad, que entra al compensador es perfecta, pues el control por bandas de histéresis permite conseguir que tenga una forma sinusoidal.

Las corrientes que entran en el puente de diodos, son mínimas. Gira en vacío.

La corriente que sale del generador, es suma de estas dos (Leyes de Kirchoff), por lo que es parecida

La onda de tensión no contiene apenas distorsión.

5.4. Mantenimiento de la potencia

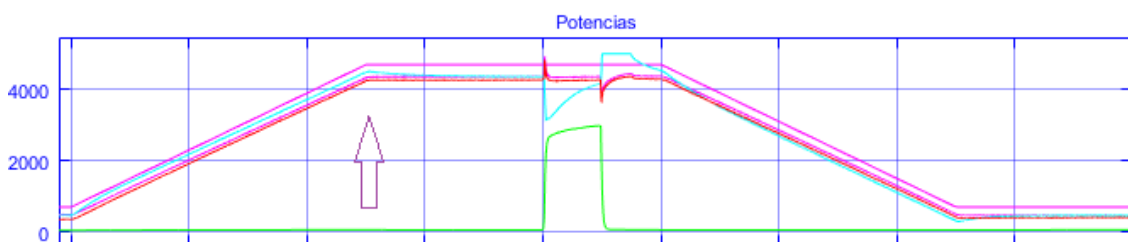


Figura 5.9. A partir de este instante, se mantiene la potencia constante.

En este, la frecuencia recupera su posición normal, también de forma asintótica.

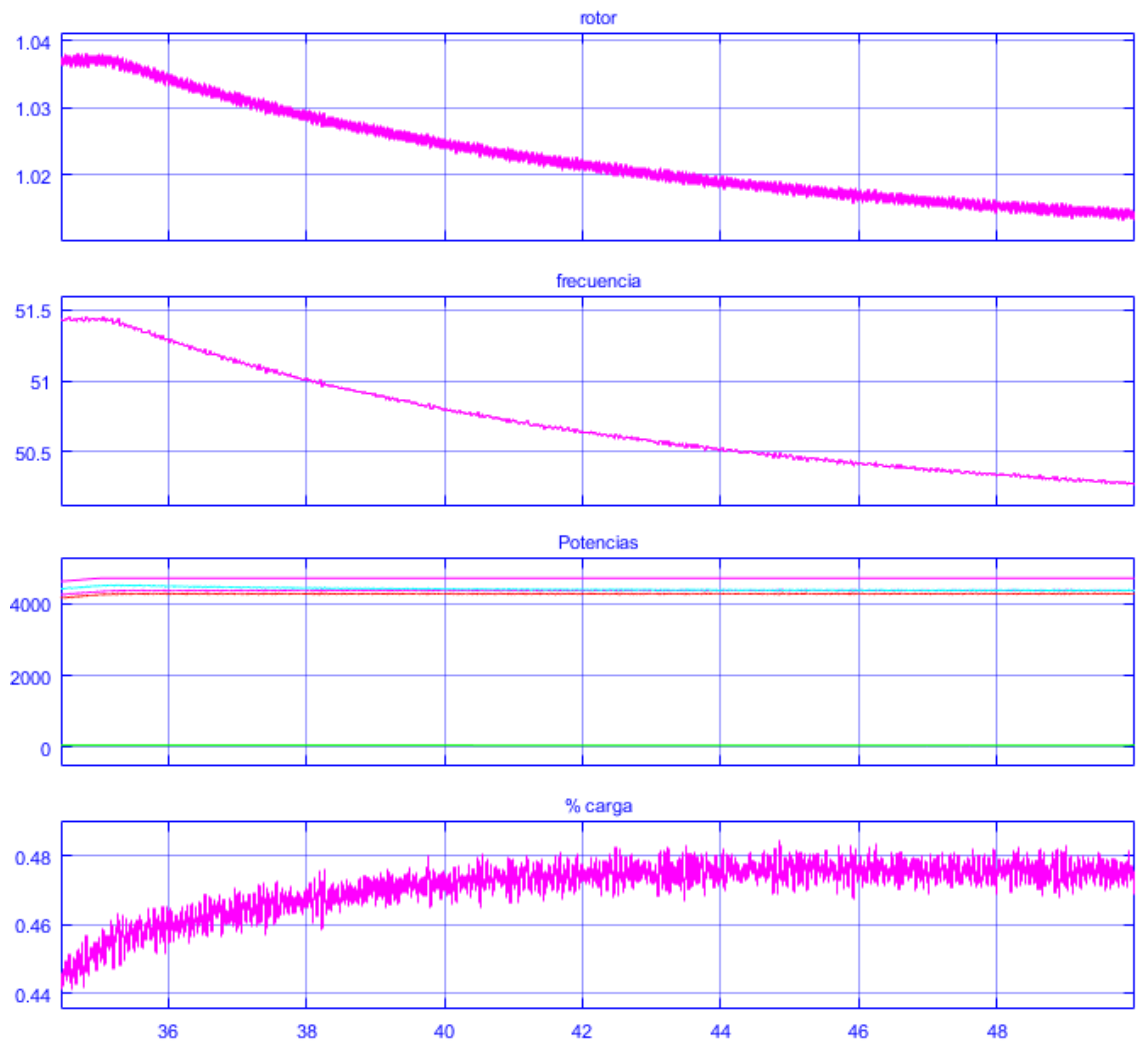


Figura 5.10. Evolución asintótica de la frecuencia. La carga se mantiene prácticamente constante.

5.5. Incorporación de la carga del usuario

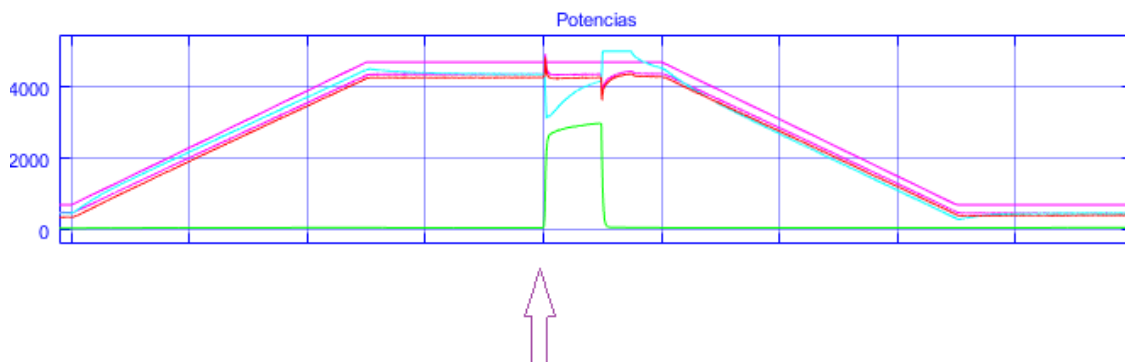


Figura 5.11. Instante en el que comienza la carga del usuario.

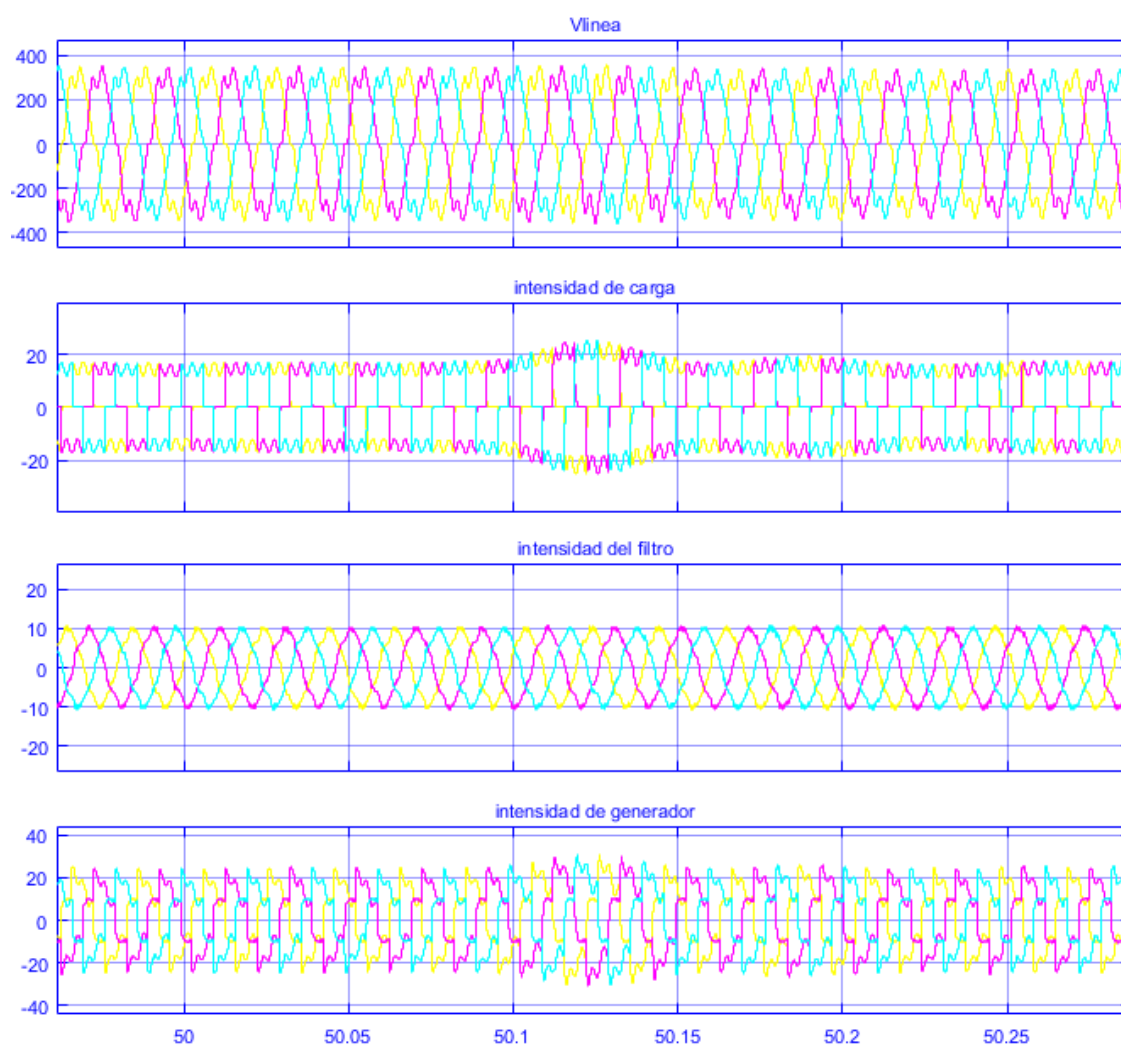


Figura 5.12.



Figura 5.13

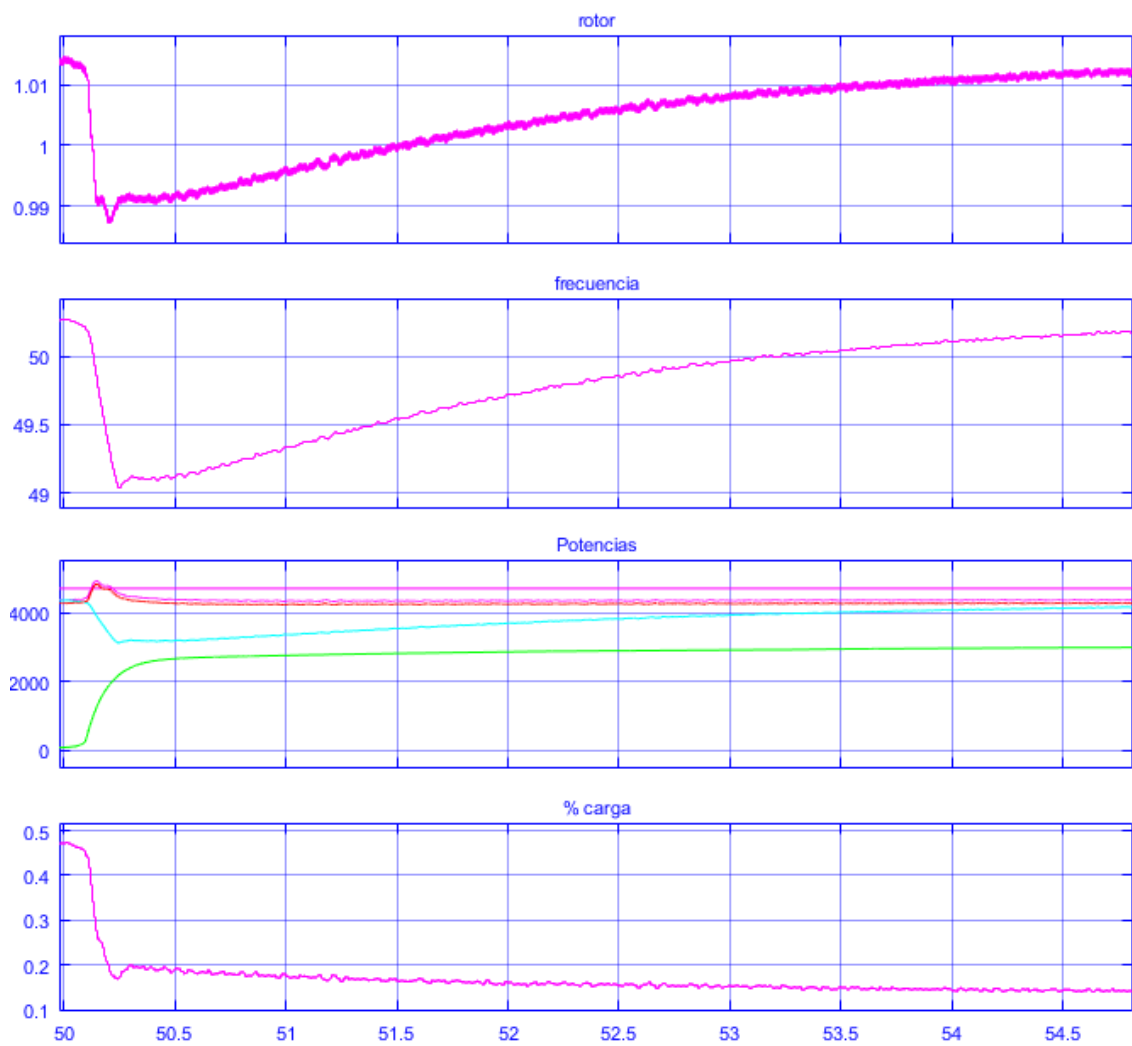


Figura 5.14.

5.6. Desconexión de la carga del usuario

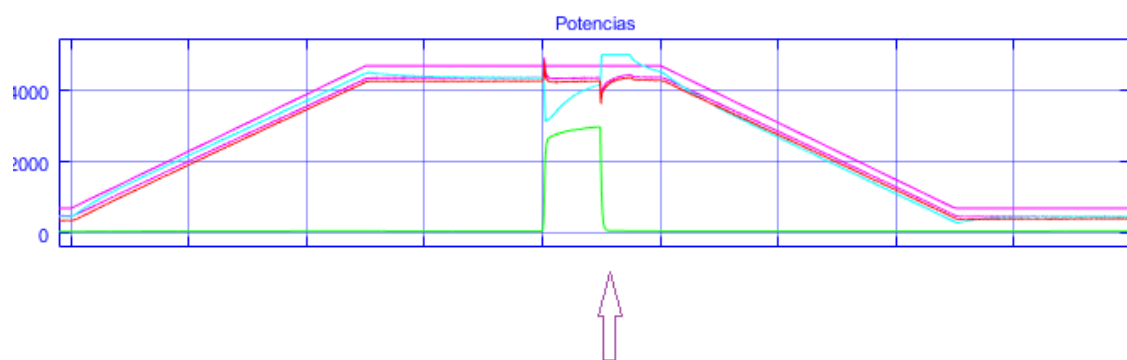


Figura 5.15.

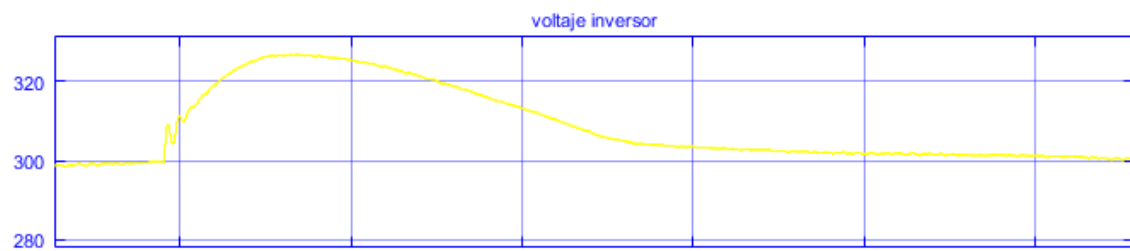


Figura 5.16.

5.6. Disminución de la entrega de potencia

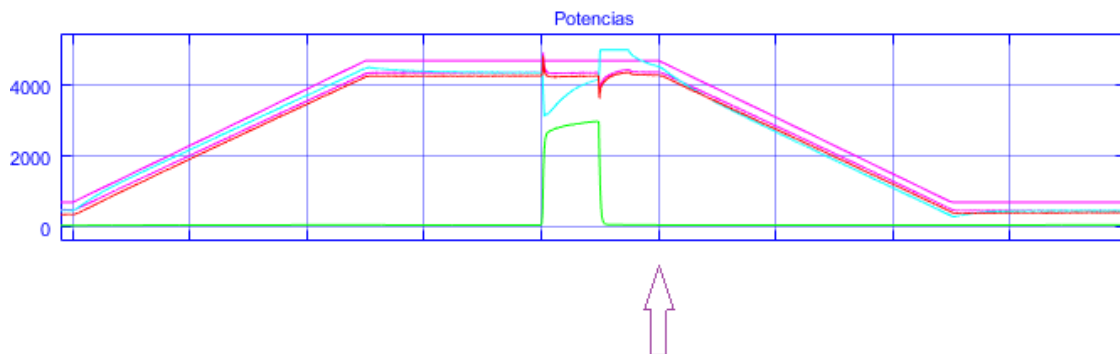


Figura 5.17.

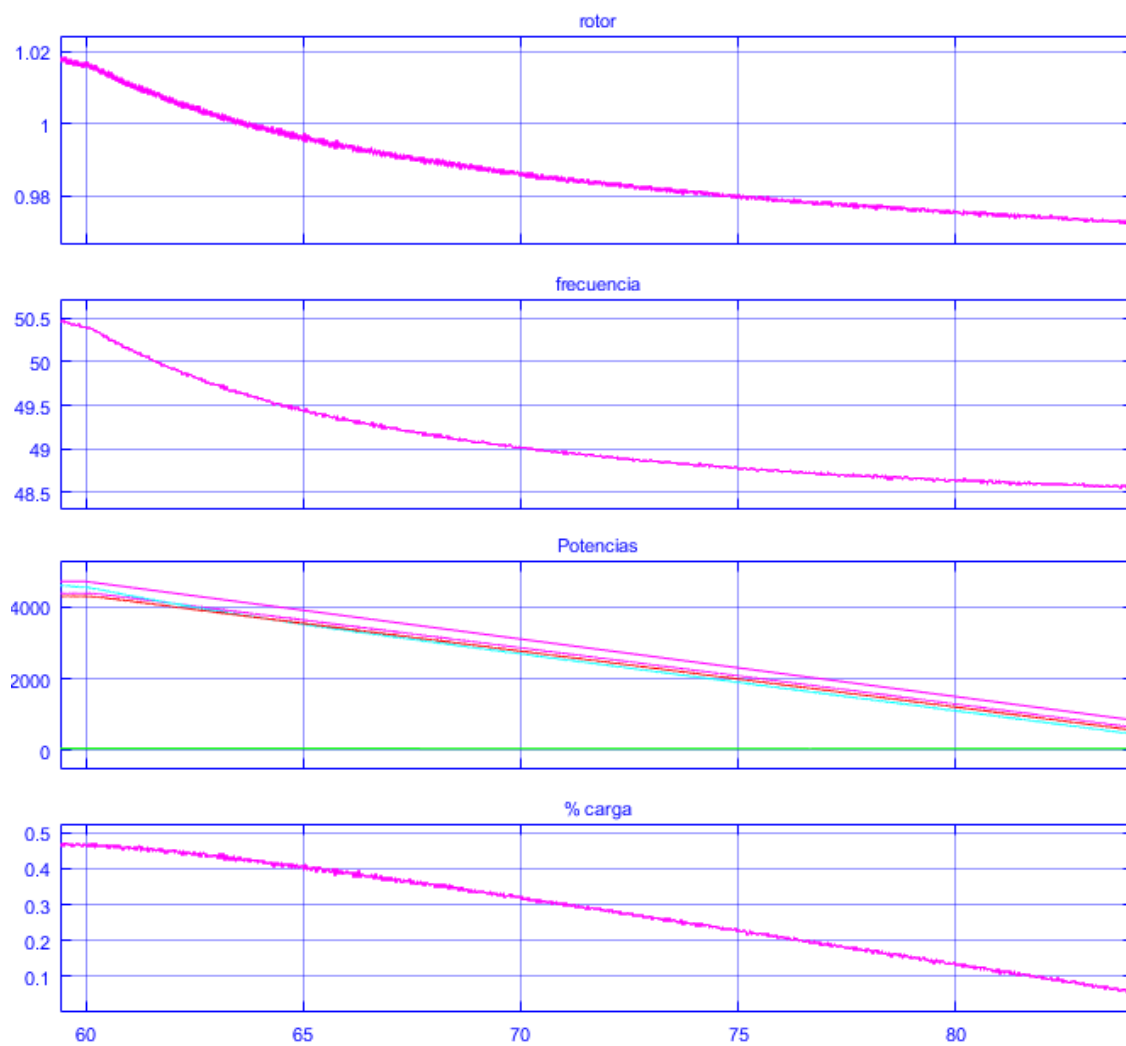


Figura 5.18.

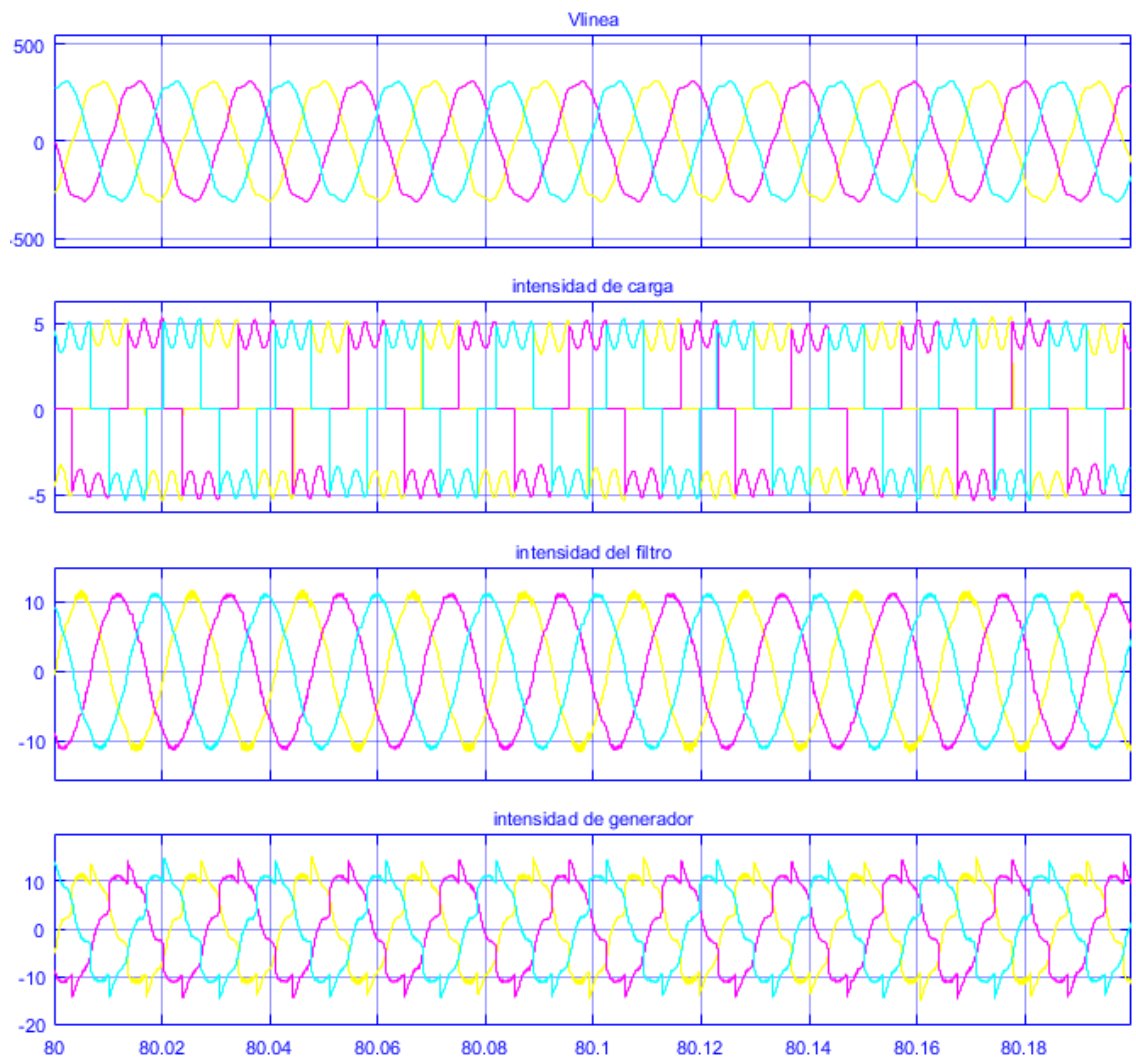


Figura 5.19.

5.7. Mantenimiento a baja potencia

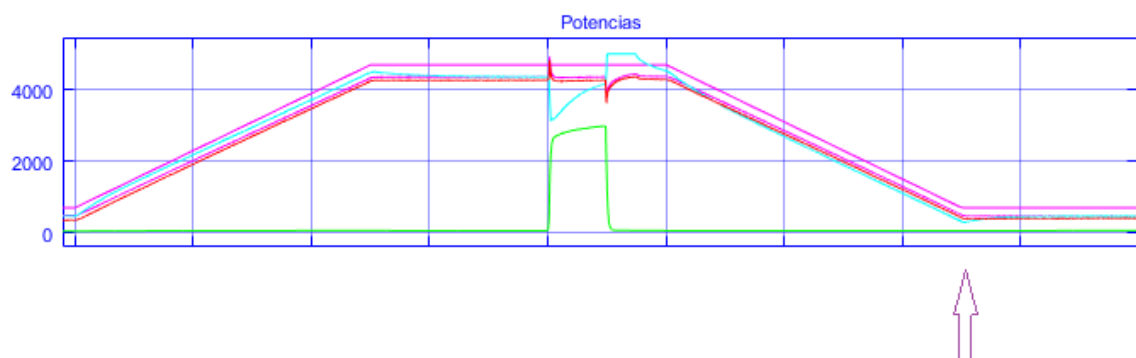


Figura 5.20.

Los últimos 15 seg. de esta simulación, son para estabilizar la frecuencia de la red. La frecuencia crecerá de forma asintótica desde el error de seguimiento, hasta los 50 Hz.

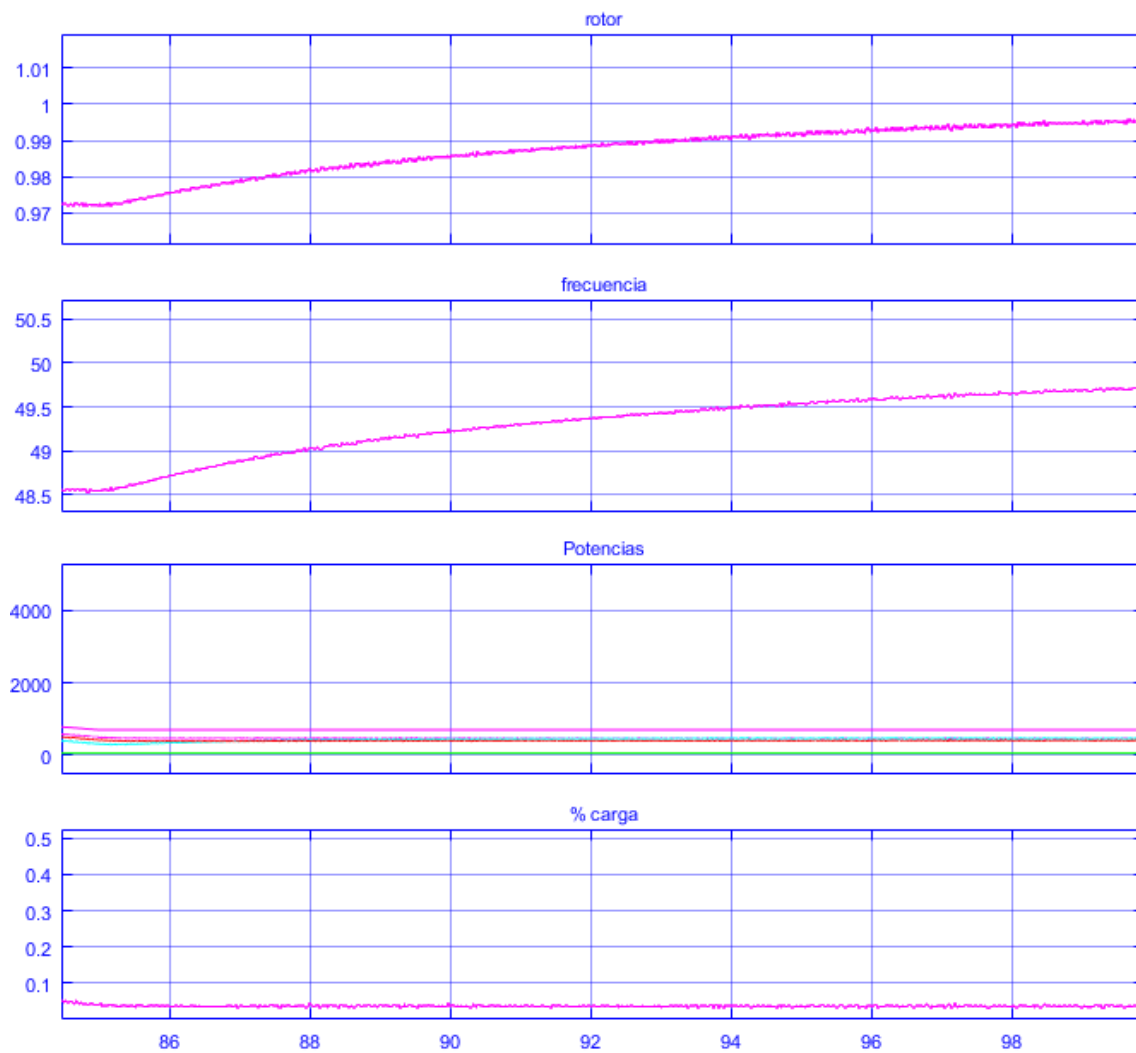


Figura 5.21.

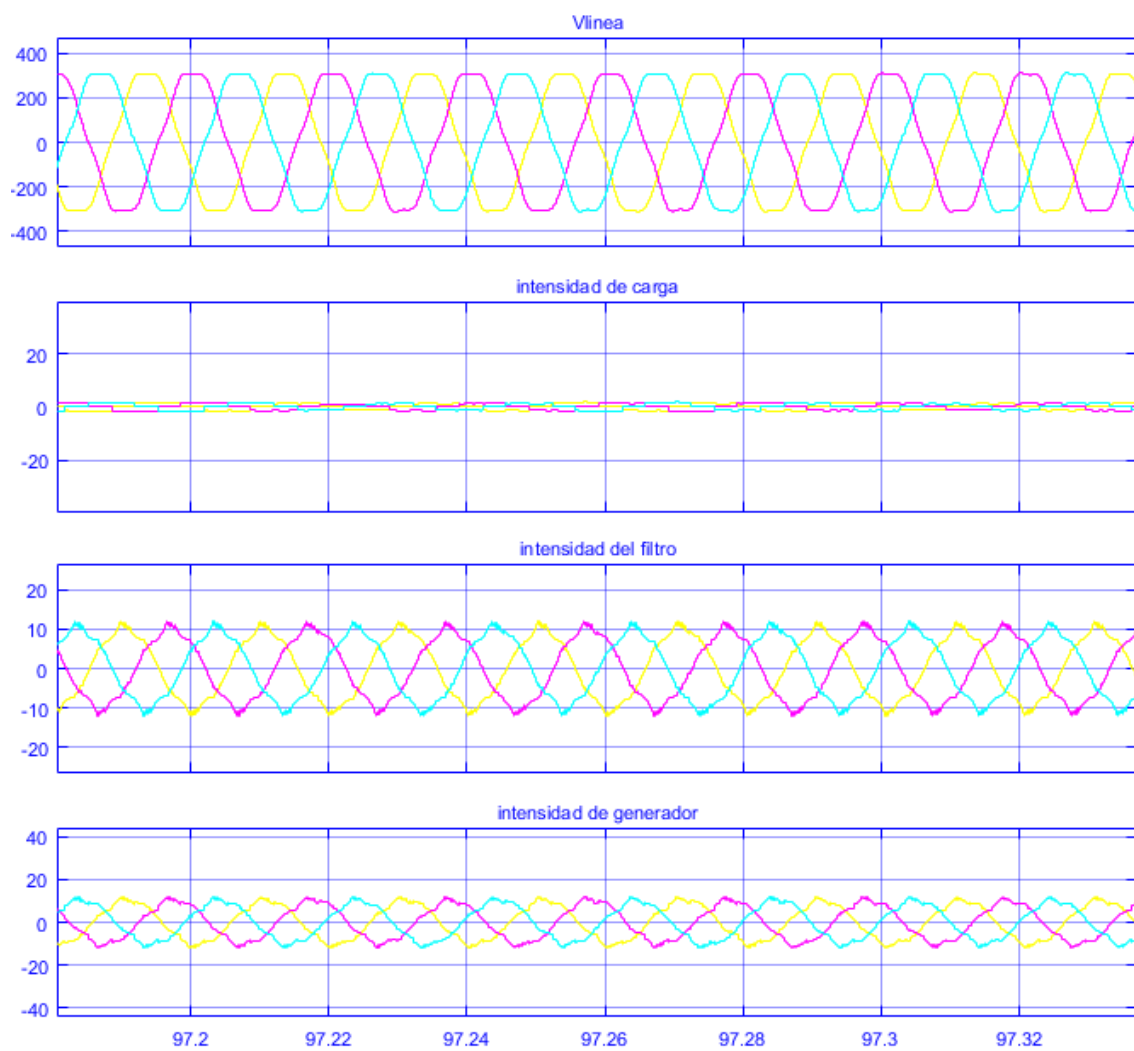


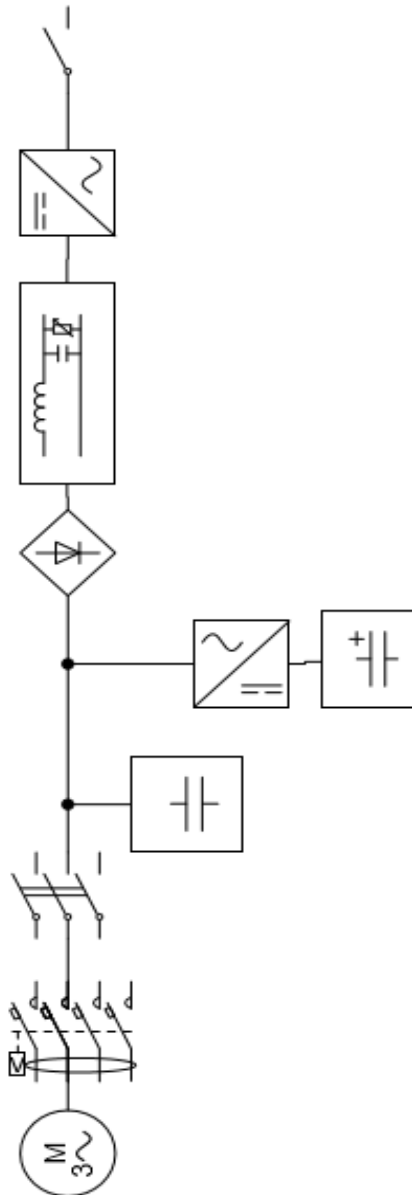
Figura 5.22.

6 Conclusiones

Como se puede observar, la estrategia implementada, permite desarrollar una tensión, con fluctuaciones menores del 10%, ante una variación brusca de carga de 3KW, la cual puede ser la más brusca que se pueda realizar en la vivienda mencionada. La frecuencia de giro del motor, se mantiene en un intervalo entre 53 y 48 Hz, lo cual se considera que es óptimo dada la brusquedad de los cambios de las cargas realizados. Podría pues ser implementado.

Anexos

Esquema unifilar



Anexo PLL

El lazo de seguimiento de fase, es una técnica utilizada en control, que obtiene una señal, cuya fase está relacionada con la fase de una señal medida. Su construcción puede realizarse de forma analógica o digital, pero cuenta con los siguientes elementos:

Detector de fase

Filtro de paso bajo

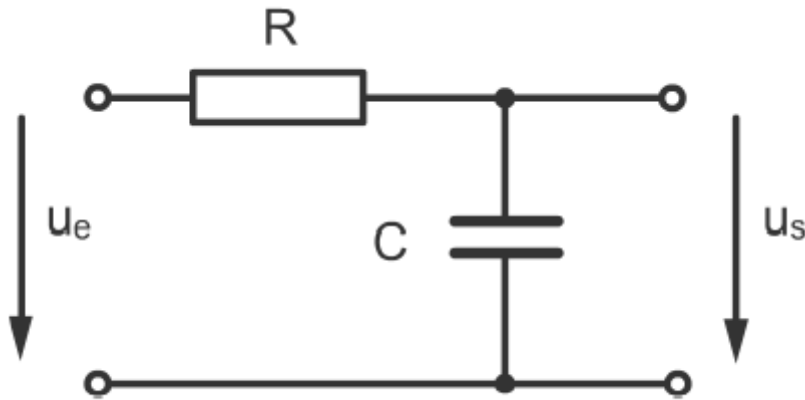
Oscilador de frecuencia variable

Retroalimentación

En una máquina de inducción autoexcitada, las variables eléctricas giran a velocidad distinta que la del rotor, por lo que no hay más remedio que utilizar este tipo de técnicas para conocer las variables eléctricas.

Anexo filtro de paso bajo

Es una técnica, realizable tanto de forma analógica como de forma digital, que permite la eliminación de armónicos de mayor frecuencia. Esto es importante, pues evita oscilaciones en los PI, debidas al ruido.



Filtro de primer orden implementado con electrónica.

$$U(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_0}} \cdot I(s) \quad \omega_0 = 1/RC$$

$$U(z) = \frac{1}{1 + \frac{2}{\omega_0 T_s} \frac{z-1}{z+1}} \cdot I(z)$$

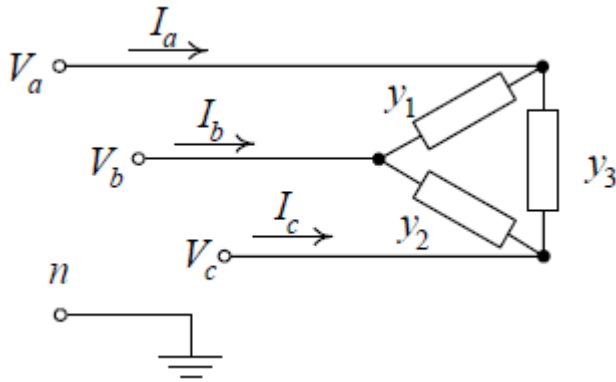
$$U_{k+1} = \frac{\omega_0 T_s}{2 + \omega_0 T_s} \cdot I_{k+1} + \frac{\omega_0 T_s}{2 + \omega_0 T_s} \cdot I_k + \frac{2 - \omega_0 T_s}{2 + \omega_0 T_s} \cdot U_k$$

*Discretización del filtro anterior para poder implementarlo en un microprocesador.
Imagen obtenida de los apuntes de “Control de máquinas eléctricas de la ETSII”*

Además de la eliminación de armónicos, se produce un retraso de la señal, lo que puede ser perjudicial en aplicaciones de control en tiempo real, lo que obliga a tener que gestionar si se prefiere ruido o retraso.

Anexo: Otros métodos de obtener alterna

La simulación propuesta en el trabajo, obtiene esa monofase, a partir de una transformación desde continua usando un puente rectificador y un puente de transistores, como si de un variador de frecuencia se tratase. Existen trabajos, que obtienen esa monofase conectando la carga directamente a los bornes del generador. Esto, que en principio parece que desequilibra a nuestra máquina, se puede evitar estableciendo distintos valores de susceptancia en cada fase. Y aquí se trata de demostrar [12].



Modelo de tensiones e intensidades de la carga.

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_3 + y_1 & -y_1 & -y_3 \\ -y_1 & y_1 + y_2 & -y_2 \\ -y_3 & -y_2 & y_2 + y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \mathbf{YV}$$

Matriz de admitancias de una carga desequilibrada en triángulo

$$\mathbf{V}_s = \begin{bmatrix} V_0 & V_p & V_n \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{I}_s = \begin{bmatrix} I_0 & I_p & I_n \end{bmatrix}^T$$

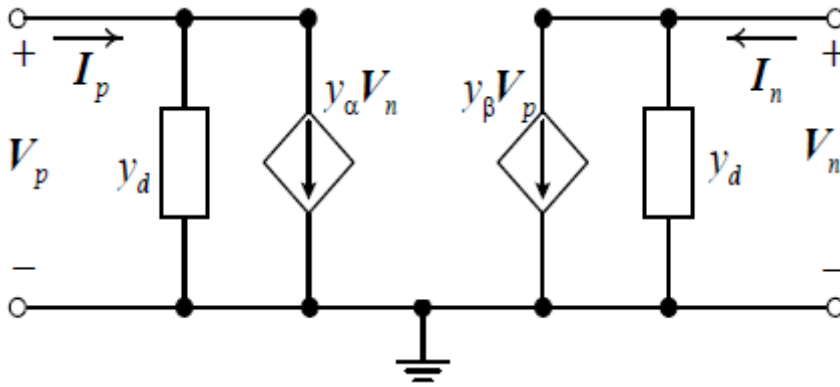
Con una matriz de cambio de base se puede pasar las tensiones y corrientes a sus componentes de secuencia directa e inversa.

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{A}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \quad a = 1 \angle 120^\circ$$

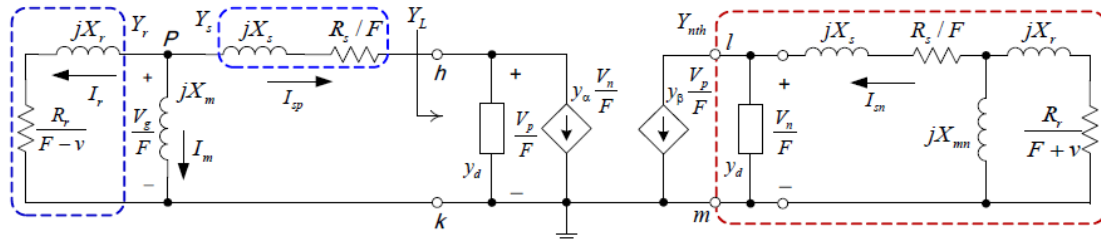
Matriz de cambio de base utilizada sobre la matriz de impedancias, para corresponderla con esta nueva referencia.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_p \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_d & y_\alpha \\ 0 & y_\beta & y_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix}$$

Nueva matriz de impedancias, debe destacarse que en un sistema en triángulo, no puede haber componentes homopolares.



Modelo de la carga con las componentes de secuencia directa e inversa.



$$y_\alpha = -(ay_1 + y_2 + a^2 y_3)$$

$$y_{\alpha=0}$$

Funcionamiento de una máquina de inducción afectada por corrientes desequilibradas. A la izquierda aparece la secuencia directa y a la derecha aparece la secuencia inversa. Se debe destacar, que si se consigue que y_α sea nulo, no habrá tensión de secuencia inversa, por lo que se comportará como si estuviera equilibrada, entregando toda la potencia, sin vibraciones y sin sobrecalentamientos.

En el modelo arriba descrito, se puede ver que la corriente de secuencia inversa, equivale a la corriente de un frenado a contramarcha propia de un motor.

Para $y_\alpha=0$, se pueden encontrar dos imaginarios puros, y_2, y_3 , tales que consigan que y_1 sea la única admitancia con parte real. Esto implica que se puede obtener monofase, directamente de dos de los bornes de la máquina. Se quiere destacar, que en muchos países en vías de desarrollo, así es como se genera electricidad de forma barata. Con necesidades exclusivas como calefacción e iluminación, para una potencia fija no hay necesidad de control sobre la reactiva,

Este modelo es conocido en motores trifásicos que operan en sistemas monofásicos, ya que permite equilibrarlos, ajustando únicamente un condensador, a la potencia requerida (conexión Steinmetz).

En el uso como generador, esto se complica, pues son necesarias tres susceptancias para conseguir la tensión, la frecuencia y la ausencia de desequilibrios, que en potencias pequeñas son tres condensadores de diferente capacidad. Aunque conforme se incrementa la potencia entregada, una de esas susceptancias pasa a tener signo negativo, por lo que en vez de un condensador, debe utilizarse una reactancia si se quiere que sea equilibrada la entrega de potencia.

La combinación de reactancias con condensadores no es recomendable, pues varían su comportamiento a distintas frecuencias y existe posibilidad de que aparezcan resonancias entre los distintos elementos, provocando sobretensiones que pueden dañar a los elementos de los que se dispone. El control de la frecuencia, aunque se trata de mantener en todo momento en 50Hz, hay que asumir que puede variar en 1 o 2 Hz, pudiendo aparecer resonancias en alguno armónico de mayor frecuencia.

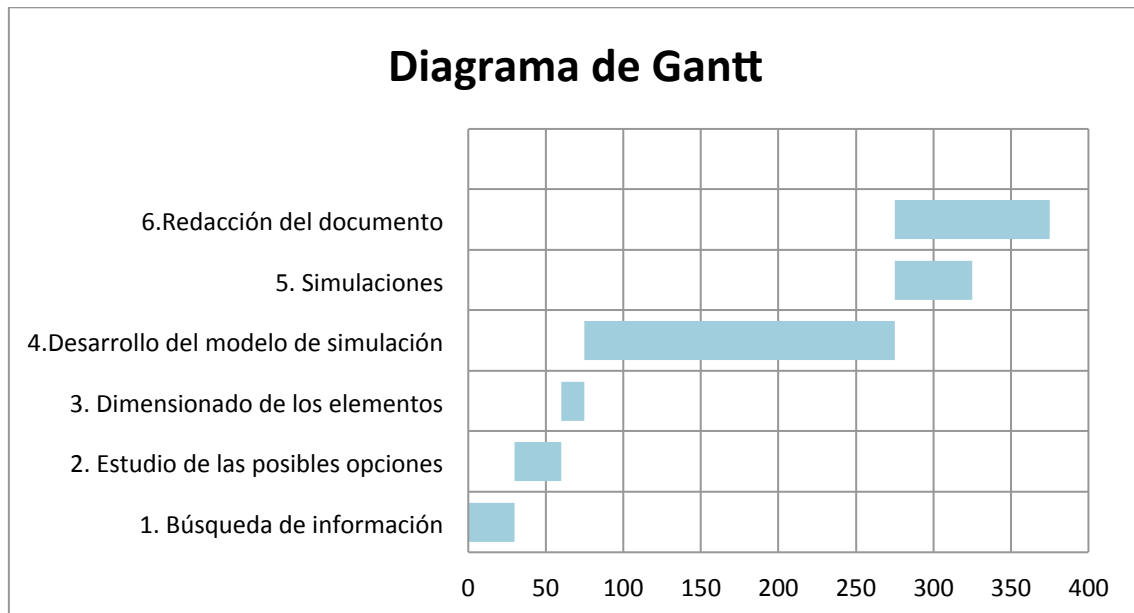
Por otra parte, conseguir estos puntos de equilibrio es complejo, debido a que para obtenerlos se necesita realizar un ajuste preciso de las admitancias y_1, y_2, y_3 antes citadas, es muy fácil salirse de estos puntos, ya que cualquier cambio en la potencia de entrada al generador como la variación del factor de potencia, puede suponer que se desequilibre la máquina, causando pulsaciones, pérdidas de eficiencia y calentamiento en exceso. Se quiere indicar, que hay trabajos en IEEE, que tratan de entregar este diferente cantidad de potencia reactiva, cambiando la lógica [10 y 11] de control del compensador del **apartado 2.3.2.3.2**. Como ya se ha dicho, estos elementos son capaces de graduar la potencia reactiva que entregan, pero también son capaces de entregar una cantidad de reactiva diferente por cada fase. Esto permite que variando la estrategia de control utilizada en la simulación principal que se desarrolla en la memoria, se pueda obtener monofase, a partir de un sistema trifásico, considerando este como un caso particular de sistema trifásico, desequilibrado. No se llegó a comprender del todo esa lógica, por lo que no se han plasmado en el TFG.

Presupuesto

En cuanto al presupuesto, se debe decir que no se ha llegado a pasar del planteamiento teórico, lo cual implica que ha sido barato. Más allá del pago de la electricidad y las licencias de IEEE, Matlab y simulink.

Tiempo dedicado

Si que se han sobrepasado los ECTS que requiere un TFG. Sobretudo se ha debido a las simulaciones, pues no se tenía experiencia a la hora de trabajar en simulink, por lo que se ha tenido que estudiar todo lo que es la automática, los reguladores proporcionales integrales.



Futuros desarrollos

En cuanto a futuros desarrollos, este es un trabajo que queda incompleto y queda la futura posible implementación.

La implementación implica encontrar los elementos precisos, juntarlos y programar un microcontrolador. Esta implementación es un reto muy grande porque se requiere de unos conocimientos muy especializados en programación y diseño hardware que con las potencias con las que se trabajan, un error pueden causar daños elevados.

Si que se está satisfecho con haber elegido este TFG y agradezco tanto a mi padre como a mi tutor el haberme permitido plantearlo. Aunque no es un proyecto que pueda dar una gran remuneración, me ha permitido conocer mejor las ventajas e inconvenientes de los motores asíncronos y síncronos así como las diferencias entre ambos.

Referencias

- 1-Cross Flow Turbine Manual.
- 2-Proyecto de modificación de características del aprovechamiento para fuerza motriz situado en el río moral para incorporar una microcentral hidroeléctrica
- 3- Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo.
- 4-Wikipedia Pelton
- 5-Wikipedia Francis
- 6-Wikipedia Kaplan
- 7- <http://www.ossberger.de/>
- 8- <http://tecnoturbinas.com/>
- 9-Hydro electronics
- 10-Integrated Electronic Load Controller with T-Connected Transformer for Isolated Asynchronous Generator
- 11-Electronic Load Controller for a Parallel Operated Isolated Asynchronous Generator Feeding Various Loads
- 12- A Method for Balancing a Single-Phase Loaded Three-Phase Induction Generator Yaw-Juen Wang and Ming-Hsueh Lee
- 13-<https://www.sites.google.com/site/hydrocontrol1/>